

เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีในข้อมูลซูโดเรนจ์
ด้วยการประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอสแบบจุดเดี่ยว



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIMIZATION TECHNIQUE FOR PSEUDORANGE MULTIPATH MITIGATION
USING GNSS SINGLE POINT POSITIONING TECHNIQUE



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy in Geomatic Engineering

Department of Survey Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อนจาก คลื่นหลายวิถีในข้อมูลซูโดเรนจ์ด้วยการประมวลผลข้อมูลจี เอ็นเอสเอสแบบจุดเดี่ยว
โดย	น.ส.วลัญชอร เอื้อรัตน์วงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สลธิระพจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิ ตรีสิริสัจตยวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สลธิระพจน์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ธีทัต เจริญกาลัญญาตา)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรวิก ตันเกษรานนท์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ทยาทิพย์ ทองตัน)

วลัญช์ อีร์ตนวนงศ์ : เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อขจัดค่าคลาดเคลื่อนจาก
 คลื่นหลายวิถีในข้อมูลชุดโดเรนท์ด้วยการประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอสแบบจุดเดี่ยว. (
 OPTIMIZATION TECHNIQUE FOR PSEUDORANGE MULTIPATH
 MITIGATION USING GNSS SINGLE POINT POSITIONING TECHNIQUE) อ.ที่ปรึกษา
 หลัก : ศ. ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์

ในการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวด้วยข้อมูลชุดโดเรนท์นิยมใช้เทคนิคเลือกหรือตัดสัญญาณดาวเทียมที่ไม่มีคุณภาพออกเพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี โดยอาศัยค่าเกณฑ์จากค่าพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับลักษณะของคลื่นหลายวิถี ได้แก่ ค่าเศษเหลือ, ค่ามุมสูงดาวเทียม และค่าชี้วัดความแรงของสัญญาณ อย่างไรก็ตามในวิธีแบบพื้นฐานที่กำหนดใช้ค่าเกณฑ์แบบค่าคงที่อาจทำให้ค่าคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นจากการตัดสัญญาณที่มีคุณภาพออก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคเลือกสัญญาณดาวเทียม 5 วิธี ที่อาศัยค่าเกณฑ์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1) การตัดสัญญาณจากค่าเศษเหลือด้วยเทคนิค RAIM (Receiver autonomous integrity monitoring) 2) การตัดสัญญาณจากค่ามุมสูงดาวเทียมโดยอาศัยภาพพิชอาย 3) การตัดสัญญาณจากค่า SNR (Signal-to-noise ratio) ที่สัมพันธ์กับมุมสูงดาวเทียม 4) การตัดสัญญาณโดยอาศัยขนาดความผันผวนของค่า SNR และ 5) การตัดสัญญาณจากค่าเศษเหลือของค่า SNR ด้วยการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีน (K-means clustering) เพื่อหาเทคนิคที่ให้ค่าเหมาะสมที่สุด ในงานวิจัยได้ทดสอบโดยใช้ข้อมูลค่าสังเกต GNSS แบบ 2 ระบบ และ 4 ระบบดาวเทียม ผลการศึกษาพบว่าเทคนิคที่ให้ค่าเหมาะสมที่สุด คือเทคนิคที่อาศัยค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม โดยกำหนดค่าเทรสโโฮลด์ที่ 10 เดซิเบลเฮิร์ต ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองในทิศทางราบและทิศทางตั้ง ลดลงจากการใช้วิธีแบบพื้นฐานสูงสุดที่ร้อยละ 0.65 และ 18.10 ตามลำดับ

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ
 ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5971488521 : MAJOR GEOMATIC ENGINEERING

KEYWORD: Multipath, Satellite signal selection method, Single point positioning (SPP)

Valanon Uaratanawong : OPTIMIZATION TECHNIQUE FOR PSEUDORANGE MULTIPATH MITIGATION USING GNSS SINGLE POINT POSITIONING TECHNIQUE. Advisor: Prof. CHALERMCHON SATIRAPOD, Ph.D.

In single-point positioning (SPP) based on pseudorange measurement, satellite signal selection or exclusion methods are widely used for multipath mitigation purpose. Three parameters correlated to multipath characteristic are determined to be a threshold for signal exclusion: residual, satellite elevation angle, and signal-to-noise ratio (SNR). However, the normal SPP method using a constant threshold value can often lead to an increase in positioning error due to exclusion of good signal. This research aimed to evaluate the efficiency of five proposed methods using different threshold values. The first method was based on pseudorange residual by using the receiver autonomous integrity monitoring algorithm (RAIM). The second method was the elevation angle mask based on a fisheye image. The third method was based on elevation-dependent average SNR. The fourth method was based on the magnitude of SNR fluctuation and the fifth method used NLOS exclusion based on SNR residual clustering by the k-means algorithm. To determine the most appropriate method, the dual and quad-constellations of the GNSS measurement data were performed. The results indicated the elevation-dependent SNR method with the threshold set at 10 dB-Hz gave the optimal solutions. The RMSE in both horizontal and vertical direction decreased 0.65% and 18.10%, respectively, compared to the normal SPP method.

Field of Study: Geomatic Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมชนม์ สติระพจน์ ที่คอยให้คำแนะนำปรึกษาและช่วยให้แนวทางที่เป็นประโยชน์ในงานศึกษาวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจสอบและปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการดำเนินงานวิจัยนี้ด้วยความเอาใจใส่

ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิ รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิ ตรีสิริสัตยวงศ์ ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.กรวิก ตันภักขรนนท์ และ อ.ดร.ธีทัต เจริญกาลัญญาตา อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ และ ดร. ทยาทิพย์ ทองตัน กรรมการภายนอก ที่ได้กรุณาตรวจสอบความถูกต้องของวิทยานิพนธ์และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัย และการแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์และเหมาะสมทางเนื้อหามากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ อ.ดร.ชัยยุทธ์ เจริญผล อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ ที่คอยช่วยเหลือและแก้ไขปัญหาในการศึกษาวิจัยเรื่อยมา ขอขอบคุณที่ ๆ นิสิตปริญญาตรีบัณฑิตที่ให้คำแนะนำและให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์ตลอดหลักสูตรการศึกษา

กราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ รวมถึงญาติพี่น้อง ที่คอยสนับสนุนในทุกด้านและให้กำลังใจเสมอมา

ท้ายสุดนี้ ขอขอบพระคุณการสนับสนุนทุนในการวิจัยจาก “ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย”

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

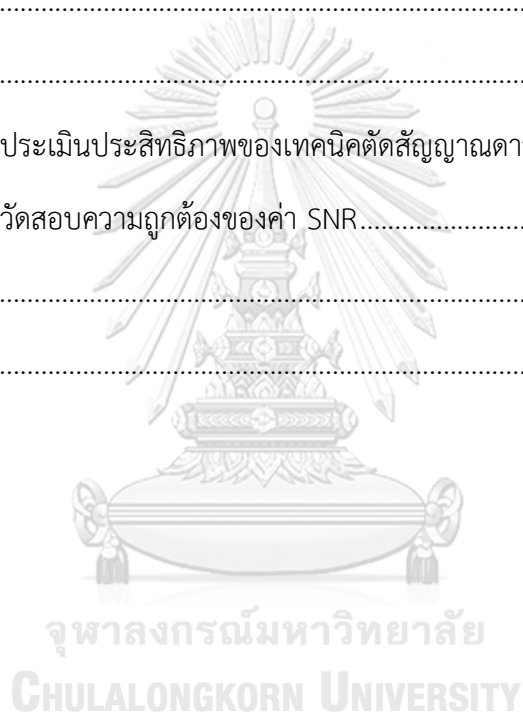
วัลัญชอร์ เอื้อรัตนวงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	15
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	15
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	19
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	19
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	19
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	20
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	21
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
2.1 วิธีการหาค่าตำแหน่งแบบจุดเดียว	22
2.1.1 การประมาณค่าตำแหน่งจากสมการค่าสังเกตของข้อมูลชุดโตนจ์	22
2.1.2 การประมาณค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี.....	23
2.2 คลื่นหลายวิถี	24
2.2.1 ลักษณะของคลื่นหลายวิถี	25
2.2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับคลื่นหลายวิถี.....	26
2.2.2.1 ค่าเศษเหลือชุดโตนจ์.....	27

2.2.2.2	ค่ามุมสูงดาวเทียม.....	27
2.2.2.3	ค่า Signal-to-noise ratio หรือ ค่า SNR	30
2.3	เทคนิคตัดสัญญาณดาวเทียมเพื่อขจัดผลจากค่าคลาดเคลื่อนคลื่นหลายวิถี	33
2.3.1	เทคนิคที่อาศัยค่าเศษเหลือด้วยการทดสอบ RAIM-FDE	33
2.3.2	เทคนิคที่อาศัยค่ามุมสูงดาวเทียม	34
2.3.3	เทคนิคที่อาศัยค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม	37
2.3.4	เทคนิคที่อาศัยขนาดความผันผวนของค่า SNR	39
2.3.5	เทคนิคที่อาศัยการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือของค่า SNR ด้วยวิธี K-means	42
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	46
บทที่ 3	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	52
3.1	การเก็บข้อมูลในสนาม.....	53
3.2	การประมวลผลข้อมูล	55
3.2.1	การทดสอบค่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้.....	55
3.2.2	การกรองสัญญาณดาวเทียม.....	55
3.2.3	การประมวลผลทางตำแหน่ง.....	59
3.3	การประเมินประสิทธิภาพของเทคนิค.....	61
บทที่ 4	ผลการทดสอบด้วยข้อมูล GNSS แบบ 2 ระบบดาวเทียม	62
4.1	ผลการทดสอบค่าเทรซโฮลด์ที่เหมาะสมที่สุด.....	62
4.2	ผลการทดสอบด้วยการประมวลผลแบบจุดเดี่ยว	64
4.2.1	ผลลัพธ์ความถูกต้องเชิงตำแหน่ง.....	64
4.2.2	ผลลัพธ์ค่าเรขาคณิตดาวเทียม	78
4.2.3	ผลลัพธ์การขจัดสัญญาณคลื่นหลายวิถี.....	79
บทที่ 5	ผลการทดสอบด้วยข้อมูล GNSS แบบ 4 ระบบดาวเทียม	80
5.1	ผลการทดสอบหาค่าเทรซโฮลด์ที่เหมาะสมที่สุด.....	80

5.2 ผลการทดสอบด้วยการประมวลผลแบบจุดเดี่ยว	82
5.2.1 ผลลัพธ์ความถูกต้องเชิงตำแหน่ง.....	82
5.2.2 ผลลัพธ์ค่าเรขาคณิตดาวเทียม	97
5.2.3 ผลลัพธ์การจัดสัญญาณคลื่นหลายวิถี.....	97
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	99
6.1 สรุปผลการศึกษา	99
6.2 ข้อเสนอแนะ	103
ภาคผนวก.....	105
ภาคผนวก ก. ผลการประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคตัดสัญญาณดาวเทียม	106
ภาคผนวก ข. ผลการวัดสอบความถูกต้องของค่า SNR.....	109
บรรณานุกรม.....	112
ประวัติผู้เขียน.....	117



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1-1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	21
ตารางที่ 3-1 แสดงค่าพิกัดอ้างอิงของข้อมูลทดสอบ	54
ตารางที่ 3-2 แสดงรายละเอียดการนำเข้าค่าพารามิเตอร์ในชุดคำสั่ง Rinex filtering	57
ตารางที่ 4-1 แสดงอัตราการตัดสัญญาณจากดาวเทียม NLOS ด้วยข้อมูลดาวเทียม 2 ระบบ	79
ตารางที่ 5-1 แสดงอัตราการตัดสัญญาณจากดาวเทียม NLOS ด้วยข้อมูลดาวเทียม 4 ระบบ	98
ตารางที่ 6-1 แสดงค่าเฉลี่ยของร้อยละการเพิ่มขึ้นของค่า GDOP	101
ตารางที่ 6-2 แสดงค่าเฉลี่ยของการตัดสัญญาณจากดาวเทียม NLOS.....	102

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1-1 แสดงการประยุกต์ใช้เทคนิคการเลือกสัญญาณดาวเทียม	17
รูปที่ 2-1 แสดงการรับสัญญาณคลื่นหลายวิถี.....	25
รูปที่ 2-2 แสดงฟังก์ชันสหสัมพันธ์ของคลื่นสัญญาณ.....	25
รูปที่ 2-3 แสดงผลจากคลื่นหลายวิถีต่อค่าเศษเหลือซูโดเรนจ์.....	26
รูปที่ 2-4 แสดงการตรวจสอบชนิดสัญญาณจากค่าเศษเหลือซูโดเรนจ์	27
รูปที่ 2-5 แสดงมุมแอมบลิทและมุมสูงในระบบพิกัด ENU	28
รูปที่ 2-6 แสดงค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีในระบบดาวเทียม GNSS.....	29
รูปที่ 2-7 แสดง Phasor diagram ของสัญญาณ GPS.....	31
รูปที่ 2-8 แสดงผลจากคลื่นหลายวิถีต่อค่า SNR	31
รูปที่ 2-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสูงดาวเทียมและค่า SNR	32
รูปที่ 2-10 แสดงแผนผังการทำงานของเทคนิค RAIM	34
รูปที่ 2-11 แสดงการตรวจสอบชนิดดาวเทียมด้วยภาพถ่ายแบบพิกซาย	35
รูปที่ 2-12 แสดงการสร้าง Mask จากการซ้อนภาพถ่ายแบบพิกซาย.....	36
รูปที่ 2-13 แสดงแผนผังการทำงานของเทคนิคที่อาศัยภาพถ่ายแบบพิกซาย	37
รูปที่ 2-14 แสดงแผนผังการทำงานของเทคนิคที่อาศัยค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม	38
รูปที่ 2-15 แสดงการสร้างค่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้จากค่าเฉลี่ยของค่า SNR.....	39
รูปที่ 2-16 แสดงผลจากคลื่นหลายวิถีต่อการผันผวนของค่า SNR.....	39
รูปที่ 2-17 แสดงขนาดคลื่นหลายวิถีและขนาดความผันผวนของค่า SNR.....	40
รูปที่ 2-18 แสดงแผนผังการทำงานของเทคนิคที่อาศัยขนาดความผันผวนของค่า SNR.....	41
รูปที่ 2-19 แสดงการตรวจจับสัญญาณจากดาวเทียม NLOS จากค่าเศษเหลือของค่า SNR.....	42
รูปที่ 2-20 แสดงแผนผังการทำงานของวิธี K-means clustering.....	45

รูปที่ 3-1 แสดงแผนผังการประมวลผลข้อมูลในงานวิจัย.....	52
รูปที่ 3-2 แสดงสภาพแวดล้อมบริเวณพื้นที่ทดสอบ	53
รูปที่ 3-3 แสดง Skyplot ของข้อมูลทดสอบ.....	54
รูปที่ 3-4 แสดงการทดสอบหาค่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้.....	55
รูปที่ 3-5 แสดงขั้นตอนการกรองข้อมูลค่าสังเกตด้วยชุดคำสั่ง Rinex filtering.....	56
รูปที่ 3-6 แสดงขั้นตอนการสร้าง Mask ค่ามุมสูงในซอฟต์แวร์ RTKLIB.....	58
รูปที่ 3-7 แสดงผลลัพธ์การจัดกลุ่มค่าเศษเหลือของค่า SNR ด้วยวิธี K-means	59
รูปที่ 3-8 แสดงตัวอย่างข้อมูล SNR ที่ผ่านการกรองสัญญาณดาวเทียมด้วยเทคนิคพิชಾಯ	59
รูปที่ 3-9 แสดงการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวด้วยฟังก์ชัน RTKPOST.....	60
รูปที่ 3-10 แสดงผลค่าพิกัดในระบบ ENU	60
รูปที่ 4-1 แสดงผลทดสอบค่าเทรซโฮลด์ที่เหมาะสมในเทคนิคที่อาศัยค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูง ดาวเทียมด้วยข้อมูลในจุดทดสอบที่ 1	62
รูปที่ 4-2 แสดงผลทดสอบค่าเทรซโฮลด์ที่เหมาะสมในเทคนิคที่อาศัยค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูง ดาวเทียมด้วยข้อมูลในจุดทดสอบที่ 2	63
รูปที่ 4-3 แสดงผลทดสอบค่าเทรซโฮลด์ที่เหมาะสมในเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR ด้วยข้อมูล ในจุดทดสอบที่ 1.....	63
รูปที่ 4-4 แสดงผลทดสอบค่าเทรซโฮลด์ที่เหมาะสมในเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR ด้วยข้อมูล ในจุดทดสอบที่ 2.....	64
รูปที่ 4-5 แสดงค่า RMSE จากการทดสอบด้วยข้อมูลดาวเทียม 2 ระบบในจุดทดสอบที่ 1	65
รูปที่ 4-6 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิค RAIM-FDE.....	66
รูปที่ 4-7 แสดงการเปรียบเทียบค่าเศษเหลือชุดเรจจากวิธีแบบพื้นฐานและเทคนิค RAIM-FDE... ..	66
รูปที่ 4-8 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคที่อาศัยภาพพิชಾಯ	67
รูปที่ 4-9 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนดาวเทียมจากวิธีแบบพื้นฐานและเทคนิคที่อาศัยภาพพิชಾಯ	67
รูปที่ 4-10 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR	68

รูปที่ 4-11 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่	68
รูปที่ 4-12 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคจัดกลุ่มด้วย K-means....	68
รูปที่ 4-13 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม.....	69
รูปที่ 4-14 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR.....	69
รูปที่ 4-15 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือด้วย K-means.....	70
รูปที่ 4-16 แสดงผลการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือของค่า SNR ด้วยวิธี K-means ที่ถูกต้อง.....	71
รูปที่ 4-17 แสดงค่า RMSE จากการทดสอบด้วยข้อมูลดาวเทียม 2 ระบบในจุดทดสอบที่ 2.....	71
รูปที่ 4-18 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิค RAIM-FDE.....	72
รูปที่ 4-19 แสดงการเปรียบเทียบค่าเศษเหลือซูโดเรจจากวิธีแบบพื้นฐานและเทคนิค RAIM-FDE	72
รูปที่ 4-20 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคที่อาศัยภาพฟิชาย.....	73
รูปที่ 4-21 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนดาวเทียมจากวิธีแบบพื้นฐานและเทคนิคที่อาศัยภาพฟิชาย	73
รูปที่ 4-22 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR	74
รูปที่ 4-23 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่	74
รูปที่ 4-24 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคจัดกลุ่มด้วย K-means....	75
รูปที่ 4-25 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม.....	75
รูปที่ 4-26 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR.....	76
รูปที่ 4-27 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือด้วย K-means.....	76
รูปที่ 4-28 แสดงตัวอย่างผลการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือด้วย K-means ที่ถูกต้อง.....	77
รูปที่ 4-29 แสดงตัวอย่างผลการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือด้วย K-means ที่ไม่ถูกต้อง.....	78
รูปที่ 4-30 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่า GDOP	79
รูปที่ 5-1 แสดงผลทดสอบค่าเทรซโฮลด์ที่เหมาะสมในเทคนิคที่อาศัยค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียมด้วยข้อมูลในจุดทดสอบที่ 1	80
รูปที่ 5-2 แสดงผลทดสอบค่าเทรซโฮลด์ที่เหมาะสมในเทคนิคที่อาศัยค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียมด้วยข้อมูลในจุดทดสอบที่ 2	81

รูปที่ 5-3 แสดงผลทดสอบค่าเทรซโฮลด์ที่เหมาะสมในเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR ด้วยข้อมูล ในจุดทดสอบที่ 1.....	81
รูปที่ 5-4 แสดงผลทดสอบค่าเทรซโฮลด์ที่เหมาะสมในเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR ด้วยข้อมูล ในจุดทดสอบที่ 2.....	82
รูปที่ 5-5 แสดงค่า RMSE จากการทดสอบด้วยข้อมูลดาวเทียม 4 ระบบในจุดทดสอบที่ 1	83
รูปที่ 5-6 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิค RAIM-FDE	84
รูปที่ 5-7 แสดงการเปรียบเทียบค่าเศษเหลือชูโตเรนจ์จากวิธีแบบพื้นฐานและเทคนิค RAIM-FDE... ..	84
รูปที่ 5-8 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคที่อาศัยภาพพิชಾಯ	85
รูปที่ 5-9 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนดาวเทียมจากวิธีแบบพื้นฐานและเทคนิคที่อาศัยภาพพิชಾಯ	85
รูปที่ 5-10 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR	86
รูปที่ 5-11 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่	86
รูปที่ 5-12 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคจัดกลุ่มด้วย K-means....	86
รูปที่ 5-13 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม.....	87
รูปที่ 5-14 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR.....	88
รูปที่ 5-15 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือด้วย K-means.....	88
รูปที่ 5-16 แสดงผลการจัดกลุ่มชนิดดาวเทียมด้วยวิธี K-means ที่ถูกต้อง.....	89
รูปที่ 5-17 แสดงผลการจัดกลุ่มชนิดดาวเทียมด้วยวิธี K-means ที่ไม่ถูกต้อง.....	89
รูปที่ 5-18 แสดงค่า RMSE จากการทดสอบด้วยข้อมูลดาวเทียม 4 ระบบในจุดทดสอบที่ 2.....	90
รูปที่ 5-19 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิค RAIM-FDE.....	90
รูปที่ 5-20 แสดงการเปรียบเทียบค่าเศษเหลือชูโตเรนจ์จากวิธีแบบพื้นฐานและเทคนิค RAIM-FDE	91
รูปที่ 5-21 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคที่อาศัยภาพพิชಾಯ.....	91
รูปที่ 5-22 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนดาวเทียมจากวิธีแบบพื้นฐานและเทคนิคที่อาศัยภาพพิชಾಯ	92
รูปที่ 5-23 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR	92

รูปที่ 5-24 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่	93
รูปที่ 5-25 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคจัดกลุ่มด้วย K-means....	93
รูปที่ 5-26 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม.....	94
รูปที่ 5-27 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR.....	94
รูปที่ 5-28 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือด้วย K-means.....	95
รูปที่ 5-29 แสดงผลการจัดกลุ่มชนิดดาวเทียมด้วยวิธี K-means ที่ถูกต้อง.....	95
รูปที่ 5-30 แสดงผลการจัดกลุ่มชนิดดาวเทียมด้วยวิธี K-means ที่ไม่ถูกต้อง.....	96
รูปที่ 5-31 แสดงผลการจัดกลุ่มด้วยวิธี K-means ที่ไม่สอดคล้องกับผลจากภาพฟิชอาย	96
รูปที่ 5-32 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่า GDOP	97



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การใช้เครื่องรับสัญญาณที่มีประสิทธิภาพในการรังวัดด้วยระบบนำหนดาวเทียม GNSS แบบหลายระบบ หรือ Multi-GNSS แม้จะช่วยเพิ่มจำนวนดาวเทียมที่ได้รับ และส่งผลให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดทางสภาพแวดล้อมในพื้นที่ที่ประกอบด้วยวัตถุที่เป็นอุปสรรคต่อการรับสัญญาณจำนวนมาก เช่น ตึก อาคารสูง ต้นไม้ และยานพาหนะ ส่งผลให้ดาวเทียมที่รับได้บางส่วนมีลักษณะเป็นดาวเทียมที่อยู่ในแนวอวกเส้นสายตา หรือดาวเทียม NLOS (Non-line-of-sight satellite) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการรับสัญญาณสะท้อนในลักษณะคลื่นหลายวิถี (Multipath)

การเจือปนของคลื่นหลายวิถีในสัญญาณดาวเทียมทำให้ข้อมูลค่าสังเกตที่วัดได้ผิดไปจากปกติ และส่งผลต่อค่าความถูกต้องของการวัดระยะซูโดเรนจ์ (Pseudorange) หรือระยะทางจากดาวเทียมไปยังเครื่องรับสัญญาณ ซึ่งนำไปสู่ค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในระดับเมตร โดยเฉพาะในกรณีที่รับสัญญาณบริเวณที่มีคลื่นหลายวิถีรุนแรง โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในการรับสัญญาณเป็นเวลานาน อาจก่อให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนมากกว่า 100 เมตร หรือมากที่สุดในระดับกิโลเมตร ในกรณีที่จุดรับสัญญาณมีระยะห่างมากจากพื้นผิวสะท้อน (Petovello, 2013)

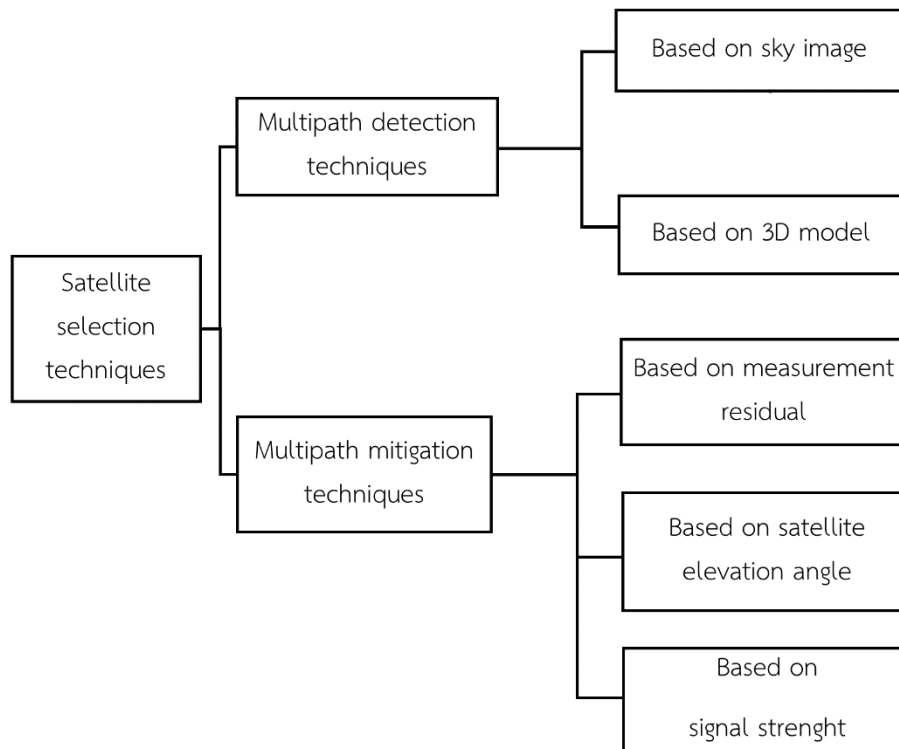
เนื่องจากค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีมีลักษณะเป็นค่าคลาดเคลื่อนแบบสุ่มที่มีรูปแบบการเกิดที่ไม่แน่นอน และไม่สามารถปรับแก้ได้ด้วยเทคนิคการหาค่าต่างหรือแบบจำลองมาตรฐานที่ใช้ในการลดค่าคลาดเคลื่อนชนิดอื่น (Rizos, 1997; Satirapod & Rizos, 2005) ดังนั้นในการขจัดคลื่นหลายวิถีในสัญญาณจึงนิยมอาศัยเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือที่ใช้ในการรับสัญญาณ, วงจรในเครื่องรับสัญญาณ และการประมวลผลสัญญาณโดยอาศัยข้อมูลดาวเทียมที่วัดได้ (Groves, 2013)

ในงานรังวัดที่ต้องการความละเอียดและความถูกต้องสูงในระดับเซนติเมตร นิยมเลือกใช้เสาอากาศและเครื่องรับสัญญาณที่มีคุณภาพสูง ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อตัดและกรองสัญญาณสะท้อน เช่น การใช้ Choke ring ติดกับแผ่นกราวด์ที่เสาอากาศ, การใช้เสาอากาศแบบโพลาไรเซชันคู่ (Dual-polarization) เพื่อลดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณสะท้อนลงได้ (Groves et al., 2013) นอกจากนี้ยังมีการใช้อาเรย์ของเสาอากาศ (Antenna array) เพื่อวัดมุมของสัญญาณและจำแนกประเภทสัญญาณ

หรือ การใช้หลายเสาอากาศ (Multiple antenna) เพื่อตรวจจับคลื่นหลายวิถีจากความไม่คงที่ของสัญญาณ อย่างไรก็ตามเทคนิคเหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือที่มีราคาสูง ดังนั้นจึงนิยมใช้ในยานพาหนะขนาดใหญ่ เช่น เรือ รถไฟ เครื่องบิน เช่นเดียวกับการขจัดคลื่นหลายวิถีด้วยการออกแบบหรือปรับแต่งวงจรในเครื่องรับสัญญาณ เช่น การเพิ่มค่าความละเอียด (Resolution) ของวงจรดิสคริเมเนเตอร์ที่ทำหน้าที่จำแนกประเภทคลื่น (Townsend & Fenton, 1994) การพัฒนาวงจรแบบ Vector tracking เพื่อประมวลผลตำแหน่งด้วยการประมาณค่าแบบไม่เชิงเส้นด้วยวิธี Extended Kalman Filter หรือ EKF (Lin et al., 2018) เทคนิคเหล่านี้ แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพสูงในการลดค่าคลาดเคลื่อนจากการแทรกสอดของคลื่นสัญญาณสะท้อน อย่างไรก็ตาม เนื่องด้วยข้อจำกัดในเรื่องราคาและมีขั้นตอนการประมวลผลที่ซับซ้อน จึงจำเป็นต้องมีความรู้และความเข้าใจทางด้านเทคนิควงจรไฟฟ้า

ในเทคนิคที่อาศัยการประมวลผลสัญญาณซึ่งเป็นเทคนิคแบบประมวลผลภายหลัง หรือ เทคนิคแบบ Post-processed มีจุดเด่นและข้อได้เปรียบคือ อาศัยเพียงข้อมูลค่าสังเกตดาวเทียมเพื่อใช้ในการประมวลผล เช่น การกรองความถี่คลื่นสัญญาณ (Signal filtering) ด้วยวิธีเวฟเลท (Dammalage et al., 2020; Satirapod & Rizos, 2005) ซึ่งสามารถแยกความถี่ของคลื่นหลายวิถีออกจากสัญญาณปกติได้ สำหรับการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของเครื่องรับสัญญาณและมีรูปแบบการรับดาวเทียมชุดเดิมซ้ำ ๆ ในช่วงเวลาที่ทำการรับสัญญาณ รวมถึงมีจำนวนดาวเทียมที่รับได้มากเพียงพอ นิยมใช้เทคนิคเลือกหรือตัดสัญญาณดาวเทียมออกด้วยการกรองข้อมูลค่าสังเกต โดยอาศัยค่าเกณฑ์จากค่าพารามิเตอร์ ที่บันทึกอยู่ในข้อมูลค่าสังเกต หรือสามารถแยกออกมาคำนวณได้ ภายหลัง ค่าพารามิเตอร์ที่นิยมนำมาวิเคราะห์มีความสัมพันธ์กับลักษณะและพฤติกรรมของคลื่นหลายวิถี ได้แก่ ค่าเศษเหลือจากการวัดระยะ, ค่ามุมสูงดาวเทียม และค่าบ่งชี้ความแรงของสัญญาณ โดยในการพิจารณาเพื่อเลือกหรือตัดสัญญาณจะใช้หลักเกณฑ์ 3 ข้อได้แก่ ค่าความถูกต้องของระยะที่วัดได้จากดาวเทียมแต่ละดวง, ค่าความถูกต้องของระยะที่วัดได้ต่อดาวเทียมดวงอื่น ๆ และผลของระยะที่วัดได้ต่อค่าเรขาคณิตดาวเทียม ซึ่งหากการเลือกดาวเทียมเป็นไปตามค่าเกณฑ์เงื่อนไขที่เหมาะสมจะสามารถขจัดสัญญาณที่ไม่มีคุณภาพออกและทำให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้รับเพิ่มขึ้น

เทคนิคเลือกดาวเทียมที่ใช้ในปัจจุบันถูกพัฒนาและต่อยอดได้ในหลายวิธี อย่างไรก็ตามจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า นิยมประยุกต์ใช้ 2 เทคนิคร่วมกัน คือเทคนิคเพื่อตรวจสอบชนิดสัญญาณ หรือ Detection techniques และเทคนิคเพื่อลดค่าคลาดเคลื่อน หรือ Mitigation techniques ซึ่งแสดงในรูปแบบที่ 1-1



รูปที่ 1-1 แสดงการประยุกต์ใช้เทคนิคการเลือกสัญญาณดาวเทียม

ในเทคนิคตรวจสอบสัญญาณมีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกชนิดของสัญญาณว่ามาจากดาวเทียม LOS ที่อยู่ในแนวเส้นสายตาหรือดาวเทียม NLOS ที่อยู่นอกแนวเส้นสายตา การตรวจจับสัญญาณจากดาวเทียม NLOS ซึ่งคาดว่าเป็นสาเหตุหลักของการรับคลื่นหลายวิถีสามารถทำได้โดยอาศัยภาพเสมือนหรือแบบจำลองสิ่งแวดล้อมโดยรอบเครื่องรับสัญญาณซ้อนทับกับข้อมูลตำแหน่งดาวเทียม ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีเพื่อให้ได้มาซึ่งภาพ เช่น การสร้างแบบจำลองสามมิติ (Hsu et al., 2015; Suzuki & Nobuaki, 2015; Tongleamnak & Nagai, 2017), การสร้างแบบจำลองภาพเสมือนทรงกลมแบบพีซาย (Suzuki & Nobuaki, 2015; Tongleamnak & Nagai, 2017) หรือ การถ่ายภาพจากกล้องโดยใช้เลนส์พีซาย (Matera et al., 2019; Sánchez et al., 2017; Suzuki, 2011; Tokura & Nobuaki, 2014; Tokura & Nobuaki, 2016; Tokura & Nobuaki, 2017; Uaratanawong et al., 2020)

สำหรับเทคนิคเพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีจะนิยมอาศัยค่าเกณฑ์ในการกรองสัญญาณจากค่าพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับขนาดและรูปแบบพฤติกรรมของคลื่นหลายวิถี เช่น วิธีเลือกสัญญาณจากค่าเศษเหลือด้วยอัลกอริทึม RAIM (Receiver - Autonomous Integrity Monitoring)

เพื่อให้ได้กลุ่มดาวเทียมที่มีคุณภาพดีที่สุด (Self-consistent group) (Blanch et al., 2015; Hsu et al., 2016; Iwase et al., 2013; Tokura & Nobuaki, 2014; Wang et al., 2012), วิธีการตัดสัญญาณจากดาวเทียมในค่ามุมสูงที่ต่ำเพื่อลดโอกาสในการรับสัญญาณสะท้อนจากคลื่นหลายวิถี, วิธีการตัดดาวเทียมจากค่าความแรงของสัญญาณโดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน หรือ ค่า SNR (Signal-to-noise ratio) ซึ่งมีความอ่อนไหวต่อการรับคลื่นหลายวิถี ซึ่งวิธีนี้เป็นที่นิยมและถูกนำมาปรับปรุงและพัฒนาต่อยอดได้ในหลายวิธี เช่น การทดสอบหาค่าเทรซโฮลด์ในลักษณะค่าคงที่ที่เหมาะสม (Uaratanawong et al., 2020), การใช้เกณฑ์การตัดสัญญาณจากค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม (Suzuki et al., 2004; Tokura & Nobuaki, 2014), การวิเคราะห์ขนาดค่าความผันผวนของสัญญาณ (Fang et al., 2015; Tokura & Nobuaki, 2017; Uaratanawong et al., 2021) การวิเคราะห์หอนุกรมเวลาของค่า SNR (Yamamoto et al., 2015), การจัดกลุ่มชนิดดาวเทียมจากค่าเฉลี่ยของค่า SNR ด้วยวิธีเคมีน หรือ K-means clustering (Lin et al., 2018) และ การจำแนกชนิดสัญญาณโดยอาศัยค่า SNR (Hsu et al., 2015; Matera et al., 2019) เป็นต้น

จากการศึกษาและทบทวนงานวิจัยข้างต้นพบว่า การนำภาพถ่ายแบบพิกซายมาใช้เพื่อตรวจสอบและจำแนกชนิดสัญญาณดาวเทียม เป็นวิธีที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคลดค่าคลาดเคลื่อนมากที่สุดและให้ผลในการจัดคลื่นหลายวิถีที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากสามารถแสดงสภาพแวดล้อมจริงและในเวลาจริงได้ สำหรับเทคนิคลดค่าคลาดเคลื่อนด้วยการตัดสัญญาณในวิธีแบบพื้นฐาน นิยมใช้ค่าเกณฑ์จากค่าพารามิเตอร์ในลักษณะค่าคงที่ ซึ่งทำให้สัญญาณที่มีคุณภาพดีบางส่วนถูกตัดออกไป และส่งผลให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งลดลง เช่นเดียวกับในเทคนิควิธีอื่น ๆ ที่อาศัยค่าพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับคลื่นหลายวิถี ซึ่งมีการกำหนดค่าเกณฑ์ที่แตกต่างกันออกไป โดยขึ้นอยู่กับคุณภาพของสัญญาณที่ได้รับ, ขนาดของคลื่นหลายวิถี รวมถึงประเภทและประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งหากกำหนดค่าเกณฑ์ที่เหมาะสม จะสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาเทคนิคที่ให้ค่าเหมาะสมที่สุด รวมถึงค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมในแต่ละเทคนิควิธี โดยเลือกประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคตัดสัญญาณดาวเทียม 5 วิธี ได้แก่ 1) วิธีตัดสัญญาณจากค่าเฉลี่ยด้วยอัลกอริทึม RAIM 2) วิธีตัดสัญญาณจากค่ามุมสูงดาวเทียมที่สร้างจากภาพถ่ายแบบพิกซาย 3) วิธีตัดสัญญาณจากค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม 4) วิธีตัดสัญญาณจากค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่าความผันผวนของค่า SNR และ 5) วิธีตัดสัญญาณจากค่าเฉลี่ยของค่า SNR ด้วยวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means เพื่อตรวจสอบความ

ถูกต้องในการประเมินผล ในงานวิจัยได้ใช้ข้อมูลทดสอบ 4 ชุด จากการรับสัญญาณดาวเทียมใน 2 พื้นที่ศึกษาที่ได้รับผลจากคลื่นหลายวิถีต่างกัน และใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS 2 ชนิดได้แก่ เครื่องรับสัญญาณแบบ 2 ระบบดาวเทียม (Dual-constellation GNSS system) ซึ่งรับสัญญาณ GPS และ GLONASS และ เครื่องรับสัญญาณแบบ 4 ระบบดาวเทียม (Quad-constellation GNSS system) ซึ่งสามารถรับสัญญาณดาวเทียม GPS, GLONASS, BeiDou และ Galileo

เพื่อหาเทคนิคที่ให้ค่าเหมาะสมที่สุดในการขจัดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี จากการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวด้วยข้อมูลซูโดเรนจ์ ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาผลเปรียบเทียบกับการใช้เทคนิคแบบพื้นฐานที่กำหนดค่าเกณฑ์แบบค่าคงที่ โดยใช้เกณฑ์ประเมินผลประสิทธิภาพของเทคนิคใน 3 ด้าน ได้แก่ 1) การปรับปรุงค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง (Improvement of positioning accuracy) จากค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง หรือ RMSE (Root-mean-square error - RMSE), 2) การเปลี่ยนแปลงของค่าความไม่แน่นอนในองค์ประกอบด้านตำแหน่งทางเรขาคณิต หรือ ค่า GDOP (Geometry dilution of precision) และ 3) อัตราการตัดสัญญาณจากดาวเทียม NLOS (NLOS signal exclusion rate)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อทดสอบหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมในการตัดสัญญาณของแต่ละเทคนิควิธี และประเมินผลหาเทคนิคตัดสัญญาณดาวเทียมที่ให้ค่าเหมาะสมที่สุดในการลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีจากการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวด้วยข้อมูลซูโดเรนจ์

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

ในสภาพแวดล้อมที่ได้รับผลจากคลื่นหลายวิถี การรับสัญญาณได้จากดาวเทียมจำนวนมากจะเพิ่มโอกาสในการรับดาวเทียมที่ให้สัญญาณที่มีคุณภาพไม่ดี ดังนั้นการเลือกหรือตัดสัญญาณดาวเทียมโดยปรับใช้ค่าเกณฑ์ที่เหมาะสม จะสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งได้ดีกว่าการใช้กำหนดค่าเกณฑ์ซึ่งเป็นค่าคงที่ในวิธีแบบพื้นฐาน

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1) ข้อมูลรังวัดดาวเทียม GNSS ที่ใช้ในการทดสอบได้จากเครื่องรับสัญญาณแบบ 2 ระบบ และ 4 ระบบดาวเทียม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการป้องกันการรับคลื่นหลายวิถีใกล้เคียงกันและข้อมูลทั้งหมดถูกจัดเก็บอยู่ในรูปแบบไฟล์ RINEX

2) ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล ได้แก่ ซอฟต์แวร์ RTKLIB 2.4.3 b33 ใช้เพื่อประมวลผลค่าตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวและแสดงผลพิกัดข้อมูล, ซอฟต์แวร์ Spyder (Anaconda3) ประกอบด้วยคำสั่งภาษา Python ที่ใช้เพื่อกรองข้อมูล RINEX โดยอาศัยหลักการจากเทคนิคตัดดาวเทียม และ ซอฟต์แวร์ Matlab R2018a ใช้เพื่อคำนวณค่าเศษเหลือ SNR ด้วยวิธีลีสต์สแควร์และการแบ่งกลุ่มข้อมูลด้วยวิธี K-means

3) เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินผลเพื่อหาเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดในการลดผลจากคลื่นหลายวิถีพิจารณาจากความสอดคล้องของผลลัพธ์ใน 3 ด้าน ได้แก่ การปรับปรุงค่าความถูกต้องทางตำแหน่งจากค่า RMSE, ค่าเรขาคณิตดาวเทียม GDOP และความสามารถในการตัดสัญญาณจากดาวเทียม NLOS

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยแสดงในตารางที่ 1-1 โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

- 1) ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับคลื่นหลายวิถี รวมถึงเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบและลดผลค่าคลาดเคลื่อนจากการหาตำแหน่ง
- 2) เก็บรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมดได้แก่ ภาพถ่ายท้องฟ้าแบบพิกซาย, ข้อมูลจากการรังวัดดาวเทียม
- 3) พัฒนาคำสั่งโดยอาศัยหลักการจากเทคนิคเลือกดาวเทียม 5 วิธี และทดสอบหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมกับชุดข้อมูลเพื่อใช้ในการกรองสัญญาณจากข้อมูลค่าสังเกตดาวเทียม
- 4) นำข้อมูลที่ผ่านการกรองจากแต่ละเทคนิคมาประมวลผลหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวและเปรียบเทียบผล
- 5) สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคต่อการลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี
- 6) ตีพิมพ์บทความวิจัย
- 7) จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 1-1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ลำดับ	ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน	ระยะเวลาดำเนินการ (เดือนที่)							
		1	7	12	19	25	28	37	43
		-	-	-	-	-	-	-	-
		6	12	18	24	28	36	42	48
1	ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง								
2	เก็บรวบรวมข้อมูล								
3	พัฒนาคำสั่งในการประมวลผล								
4	ประมวลผลข้อมูลและวิเคราะห์ผล								
5	สรุปและอภิปรายผลการวิจัย								
6	ตีพิมพ์บทความวิจัย								
7	จัดทำวิทยานิพนธ์								

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) การศึกษาถึงประสิทธิภาพของเทคนิคเลือกดาวเทียม จากการทดสอบเพื่อปรับค่าเกณฑ์ให้มีความเหมาะสมที่สุดในแต่ละเทคนิควิธี จะเป็นประโยชน์ในการลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีจากการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว นอกจากนี้ยังสามารถนำไปปรับใช้กับวิธีการหาตำแหน่งแบบอื่น เช่น การหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์, การหาตำแหน่งแบบจลนในเวลาจริง ซึ่งจะเป็ประโยชน์ต่อการปรับปรุงและเพิ่มค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในงานด้านระบบกำหนดตำแหน่งและการนำทาง

2) คำสั่งที่พัฒนาและปรับปรุงเพื่อใช้ประมวลผลข้อมูล รวมถึงการทดสอบหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมในงานวิจัย สามารถนำไปปรับใช้และพัฒนาต่อยอดในงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดผลจากคลื่นหลายวิถีให้ดียิ่งขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิธีการหาค่าตำแหน่งแบบจุดเดียว

2.1.1 การประมาณค่าตำแหน่งจากสมการค่าสังเกตของข้อมูลชูโดเรนจ์

หลักการพื้นฐานในการหาค่าตำแหน่งแบบจุดเดียวโดยอาศัยข้อมูลชูโดเรนจ์จะใช้หลักการเล็งสกัดย้อนโดยระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณโดยใช้สมมติฐานเบื้องต้นว่าตำแหน่งของดาวเทียมและค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาดาวเทียมเป็นค่าที่ทราบ สำหรับค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศและวงโคจรดาวเทียมได้ถูกปรับแก้ด้วยแบบจำลองมาตรฐานและไม่พิจารณาถึงค่าคลาดเคลื่อนจากสัญญาณรบกวนและคลื่นหลายวิถี เนื่องจากสามารถปรับแก้ได้ภายหลัง ดังนั้นสมการค่าสังเกตชูโดเรนจ์จึงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายดังนี้ (Leick, 2004)

$$R = \rho + c * \delta_r \quad (2-1)$$

$$\text{โดยที่ } \rho = \sqrt{(X - x)^2 + (Y - y)^2 + (Z - z)^2} \quad (2-2)$$

เมื่อ R คือ ชูโดเรนจ์ที่ได้จากการวัดรหัส (เมตร)

ρ คือ ระยะทางเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณ (เมตร)

X, Y, Z คือ ค่าพิกัดฉากคาร์ทีเซียนของดาวเทียม

x, y, z คือ ค่าพิกัดฉากคาร์ทีเซียนของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

c คือ ความเร็วแสง (เมตร/วินาที)

δ_r คือ ค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)

เนื่องจากในการรับสัญญาณแบบสถิต (Static positioning) จะไม่มีการเคลื่อนที่ของเครื่องรับสัญญาณจึงทำให้ค่าพิกัดดาวเทียม X, Y, Z ในสมการที่ (2-2) จะเป็นค่าเดิมตลอดการรับสัญญาณ ดังนั้นจึงมีค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า 4 ตัว ได้แก่ ค่า x, y, z และ δ_r

ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ เนื่องจากสมการชูโดเรนจ์อยู่ในรูปแบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น และเนื่องจากแต่ละ Epoch มีการรับสัญญาณดาวเทียมมากกว่า 4 ดวง ทำให้ระบบสมการมีลักษณะเป็น Overdetermined system หรือมีจำนวนสมการมากกว่าจำนวนค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า วิธีที่นิยมใช้เพื่อแก้สมการฟังก์ชันคือ วิธีของเกาส์-นิวตัน (Gauss-newton method) ซึ่ง

คำนวณหาค่าตรวจแก้ (Corrections) ของพารามิเตอร์จากระบบสมการ แล้ววนซ้ำจนค่าตรวจแก้ที่ได้มีขนาดเล็กกล่นน้อยกว่าระดับความเที่ยงตรงที่ต้องการ โดยมีขั้นตอนดังนี้ (Gerald & Wheatley, 2004)

0. สร้าง Jacobian matrix ที่บรรจุอนุพันธ์ย่อยของสมการซูโดเรนจ์แต่ละสมการเทียบกับพารามิเตอร์แต่ละตัว และสร้าง Function matrix ที่บรรจุสมการซูโดเรนจ์

1. กำหนดให้ x_k, y_k, z_k และ $\delta r_k, k = 0$ เป็นค่าประมาณเริ่มต้นของพารามิเตอร์
 2. กำหนดค่าเงื่อนไขสำหรับหยุดวนซ้ำ หรือ Terminating condition โดยในวิธีการหาค่าตำแหน่งแบบจุดเดียว ค่าความเที่ยงตรงที่ได้จะอยู่ที่ระดับมิลลิเมตร จึงกำหนด termination condition ไว้เมื่อค่าตรวจแก้ $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.0×10^{-3}

3. แทนค่า x_k, y_k, z_k และ δr_k ลงใน Jacobian matrix และ Function matrix

4. คำนวณค่าตรวจแก้ $\Delta x_k, \Delta y_k, \Delta z_k$ และ $\Delta \delta r_k$ จาก Normal equations

5. คำนวณ ค่าพารามิเตอร์ของรอบ $k+1$ โดย

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x_k$$

$$y_{k+1} = y_k + \Delta y_k$$

$$z_{k+1} = z_k + \Delta z_k$$

$$\delta r_{k+1} = \delta r_k + \Delta \delta r_k$$

6. ถ้า $\max(|\Delta x_k, \Delta y_k, \Delta z_k|) > 1.0 \times 10^{-3}$ วนซ้ำกลับไปขั้นตอนที่ 3

7. ถ้า $\max(|\Delta x_k, \Delta y_k, \Delta z_k|) \leq 1.0 \times 10^{-3}$ หยุดการคำนวณ

2.1.2 การประมาณค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี

ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีจากการหาค่าตำแหน่งแบบจุดเดียวด้วยข้อมูลความถี่เดี่ยวสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างข้อมูลค่าสังเกตโดยอาศัยข้อมูลเฟสคลื่นส่งและข้อมูลซูโดเรนจ์ ดังแสดงในสมการที่ 2-3 (Satirapod & Rizos, 2005)

$$MP_1 = P_1 - \frac{f_1^2 + f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_1 \varphi_1 + \frac{2f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_2 \varphi_2 + K_1 \quad (2-3)$$

เมื่อ MP_1 = ขนาดของคลื่นหลายวิถีในข้อมูลซูโดเรนจ์จากคลื่นส่ง L1 (เมตร)

P_1 = ซูโดเรนจ์ของคลื่นส่ง L1 (เมตร)

φ = ค่าเฟสของคลื่นส่ง (เมตร)

λ = ความยาวคลื่น

f = ความถี่ของคลื่นส่ง

K_1 = ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่กับจำนวนลูกคลื่นเต็มลูกหรือเลขปริศนาของคลื่นส่ง L_1

เพื่อหาขนาดของคลื่นหลายวิถี จะต้องขจัดค่า K_1 ออกจากสมการที่ (2-3) โดยในกรณีที่มีข้อมูลซูโดเรนจ์เป็นจำนวนมากหรือใช้ข้อมูลในช่วงเวลายาวนานค่า K_1 สามารถคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ทางด้านขวามือทั้งหมดในสมการที่ (2-3) ดังแสดงในสมการที่ (2-4)

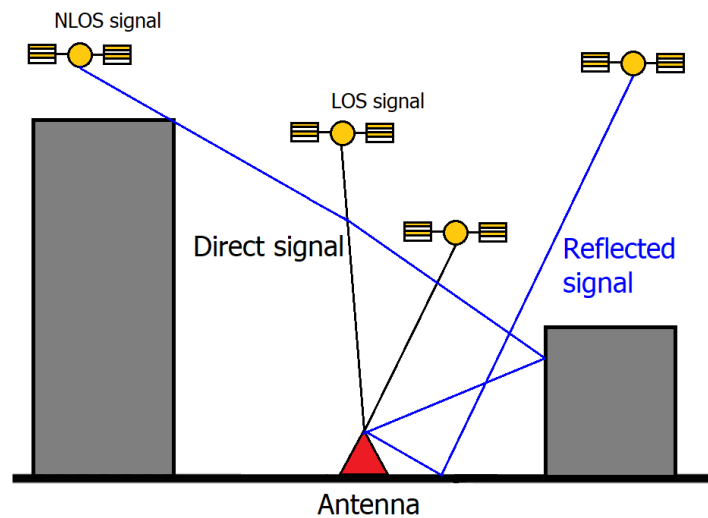
$$K_1 = \sum(MP_1 + K_1) * \frac{1}{n} \quad (2-4)$$

ขนาดของค่าคลาดเคลื่อนคลื่นหลายวิถีในข้อมูลซูโดเรนจ์สามารถคำนวณได้จากผลต่างระหว่างสมการที่ (2-3) และ (2-4) ดังแสดงในสมการที่ (2-5)

$$MP_1 = P_1 - \frac{f_1^2 + f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_1 \phi_1 + \frac{2f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_2 \phi_2 - \sum(MP_1 + K_1) * \frac{1}{n} \quad (2-5)$$

2.2 คลื่นหลายวิถี

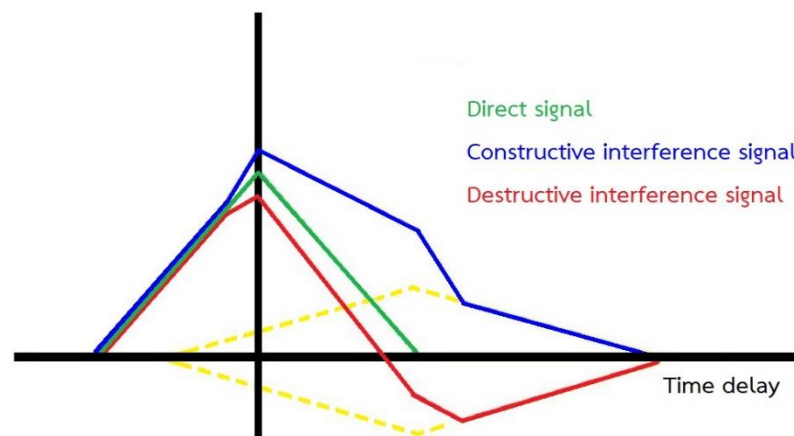
คลื่นหลายวิถี หมายถึงการรับคลื่นสัญญาณที่มีการสะท้อนกับพื้นผิวของวัตถุโดยรอบเครื่องรับสัญญาณตั้งแต่ 1 ครั้งขึ้นไป โดยพื้นผิวที่สะท้อนอาจอยู่ในแนวตั้ง แนวราบหรือแนวเอียง เช่น ผนังอาคาร ฝิวน้ำ พื้นถนน ยานพาหนะ เป็นต้น การรับสัญญาณสะท้อนจากคลื่นหลายวิถีในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดทางสภาพแวดล้อม เช่น รัยล้อมตึกและอาคารสูง มักเกิดจากการถูกบดบังการมองเห็นดาวเทียม ทำให้สัญญาณที่ได้รับมาจากกลุ่มดาวเทียมที่มีค่าเรขาคณิตดาวเทียมหรือการวางตัวของดาวเทียมบนท้องฟ้าที่ไม่ดี ส่งผลให้สัญญาณบางส่วนถูกส่งมาในลักษณะนอกเส้นสายตาหรือ NLOS (Non-line-of-sight signal) ดังแสดงในรูปที่ 2-1 การรับสัญญาณในลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งเรขาคณิตระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณ ส่งผลให้มุมรับสัญญาณและมุมสะท้อนเปลี่ยนไป (Rizos, 1997)



รูปที่ 2-1 แสดงการรับสัญญาณคลื่นหลายวิถี

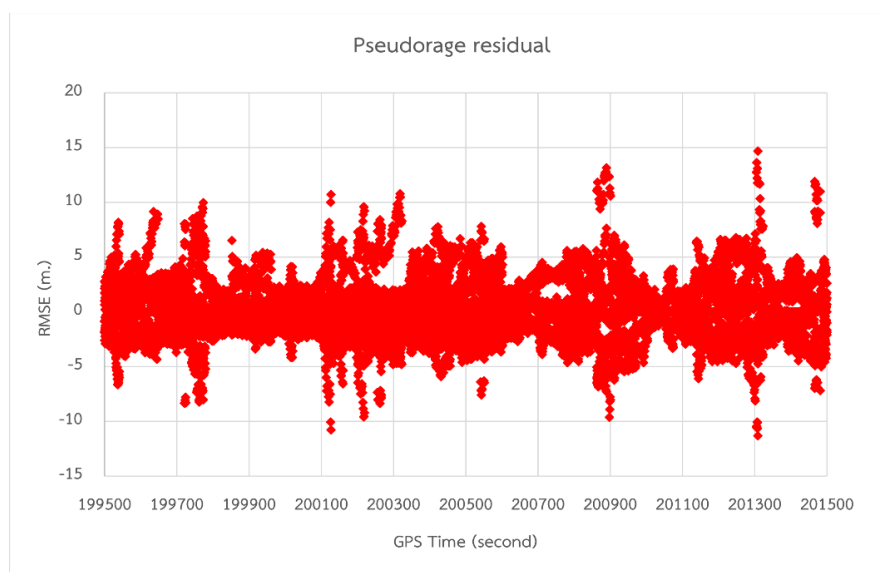
2.2.1 ลักษณะของคลื่นหลายวิถี

ในการตรวจสอบการแทรกสอดของคลื่นหลายวิถีในสัญญาณสามารถพิจารณาได้จากลักษณะเฉพาะของคลื่นหลายวิถีที่เห็นเด่นชัด คือลักษณะของสัญญาณซ้ำคาบในรูปคลื่นไซน์ (Periodical sine wave) ลักษณะเช่นนี้เกิดจากการแทรกสอดของคลื่นสะท้อนในคลื่นสัญญาณที่ส่งมาในทิศทางตรง (Direct signal) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของฟังก์ชันสหสัมพันธ์ของสัญญาณ (Signal correlation function) หรือการวิเคราะห์ความคล้ายกันของสัญญาณในช่วงเวลาต่างๆ ทำให้จุดสูงสุดของสหสัมพันธ์เกิดขึ้นมากกว่า 1 จุด ซึ่งส่งผลต่อความถูกต้องของข้อมูลที่วัดได้และทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนจากการวัดระยะ (Teunissen & Montenbruck, 2017)



รูปที่ 2-2 แสดงฟังก์ชันสหสัมพันธ์ของคลื่นสัญญาณ (ดัดแปลงจาก Fang et.al., 2015)

จากรูปที่ 2-2 ลักษณะการแทรกสอดของคลื่นหลายวิธีแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ การแทรกสอดในลักษณะเสริมกัน (Constructive Interference) และการแทรกสอดในหักล้างกัน (Deconstructive Interference) ในกรณีที่สัญญาณในทิศทางตรงและสัญญาณสะท้อนของคลื่นหลายวิธีเป็นไปในลักษณะเสริมกัน ค่าเศษเหลือซูโดเรนจ์หรือค่าคลาดเคลื่อนของระยะที่วัดได้จะเป็นค่าบวก ในทางตรงข้ามหากการแทรกสอดเป็นในลักษณะหักล้างกันค่าคลาดเคลื่อนจะเป็นค่าติดลบ



รูปที่ 2-3 แสดงผลจากคลื่นหลายวิธีต่อค่าเศษเหลือซูโดเรนจ์

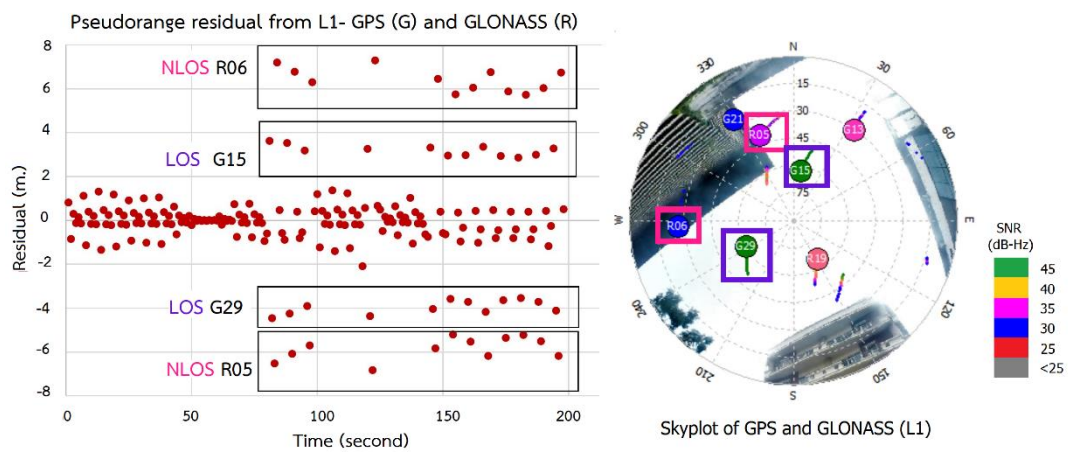
ขนาดค่าคลาดเคลื่อนของคลื่นหลายวิธีส่งผลต่อการวัดระยะซูโดเรนจ์ด้วยรหัสมากกว่าในเฟสคลื่นส่ง เนื่องจากในทางทฤษฎีขนาดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิธีจะสัมพันธ์กับความยาวคลื่น ดังนั้นค่าคลาดเคลื่อนจากการวัดระยะซูโดเรนจ์ที่เป็นไปได้มากที่สุดจะเท่ากับความยาวรหัส นั่นคือ 293 เมตรในรหัส C/A และ 29.3 เมตรในรหัส P ในขณะที่ในข้อมูลเฟสคลื่นส่งค่าคลาดเคลื่อนที่เป็นไปได้มากที่สุดจะมีขนาดไม่เกินหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นหรือประมาณ 5 ถึง 6 เซนติเมตรในคลื่น L1 และ L2 และ 20 เซนติเมตรในคลื่น L5

2.2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับคลื่นหลายวิธี

เนื่องจากคลื่นหลายวิธีเป็นค่าคลาดเคลื่อนแบบสุ่มที่มีรูปแบบการเกิดที่ไม่แน่นอน ดังนั้นในการตรวจสอบการเจือปนของสัญญาณคลื่นหลายวิธีในข้อมูลดาวเทียมจึงต้องศึกษาถึงลักษณะของค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับผลโดยตรงจากคลื่นหลายวิธีดังนี้

2.2.2.1 ค่าเศษเหลือซูโดเรนจ์

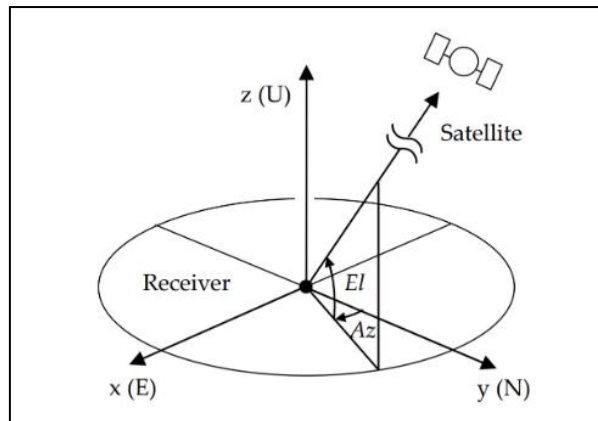
ค่าเศษเหลือ (Residual) หรือผลต่างระหว่างระยะจริงและระยะที่วัดได้แสดงถึงคุณลักษณะทางสถิติเสมือนกับความคลาดเคลื่อนที่ยังอยู่ในข้อมูล ดังนั้นหากผลจากการวัดระยะมีค่าเศษเหลือที่เป็นค่าโดด (Outlier) จะบ่งชี้ถึงค่าตำแหน่งที่คำนวณได้มีความไม่คงที่หรือไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูง (Grove, 2013; Hsu et al., 2016) ในการรับสัญญาณคลื่นหลายวิถี ระยะที่วัดได้จะเป็นผลรวมจากระยะของคลื่นสัญญาณที่ส่งมาในทิศทางตรงและระยะของคลื่นสะท้อน ส่งผลให้ค่าเศษเหลือที่ได้มีลักษณะเป็นค่าโดดจากค่าปกติที่วัดได้ (รูปที่ 2-4) จากลักษณะเฉพาะนี้ จึงสามารถใช้ในการพิจารณาเพื่อตรวจหาดาวเทียมที่มีผลจากคลื่นหลายวิถีซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งจากการรับสัญญาณในลักษณะ NLOS และ LOS



รูปที่ 2-4 แสดงการตรวจสอบชนิดสัญญาณจากค่าเศษเหลือซูโดเรนจ์

2.2.2.2 ค่ามุมสูงดาวเทียม

ทิศทางของสัญญาณจากดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณสามารถแสดงได้จากค่ามุมสูงดาวเทียม (Satellite elevation angle - EL) และค่ามุมแอซิมัท (Azimuth - Az) ดังแสดงจากรูปที่ 2-5 มุมสูงดาวเทียม คือมุมที่วัดจากดาวเทียมมายังระนาบราบของเครื่องรับสัญญาณ มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 90 องศา ส่วนมุมแอซิมัทคือมุมจากดาวเทียมที่วัดเทียบกับทิศเหนือจริงมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา



รูปที่ 2-5 แสดงมุมแอสิมัทและมุมสูงในระบบพิกัด ENU (ที่มา: Takasu, 2013)

ค่ามุมทั้งสองสามารถคำนวณได้จากค่าพิกัด ENU ของตำแหน่งดาวเทียมที่คำนวณจากข้อมูลวงโคจรดาวเทียม (Satellite ephemerids) ในข้อมูลนำหน (Navigation data) ในกรณีที่สัญญาณถูกส่งมาในทิศทางตรงโดยไม่มีการสะท้อนหรือหักเหของสัญญาณ ค่ามุมแอสิมัทและค่ามุมสูงสามารถคำนวณได้ดังนี้ (Takasu, 2013)

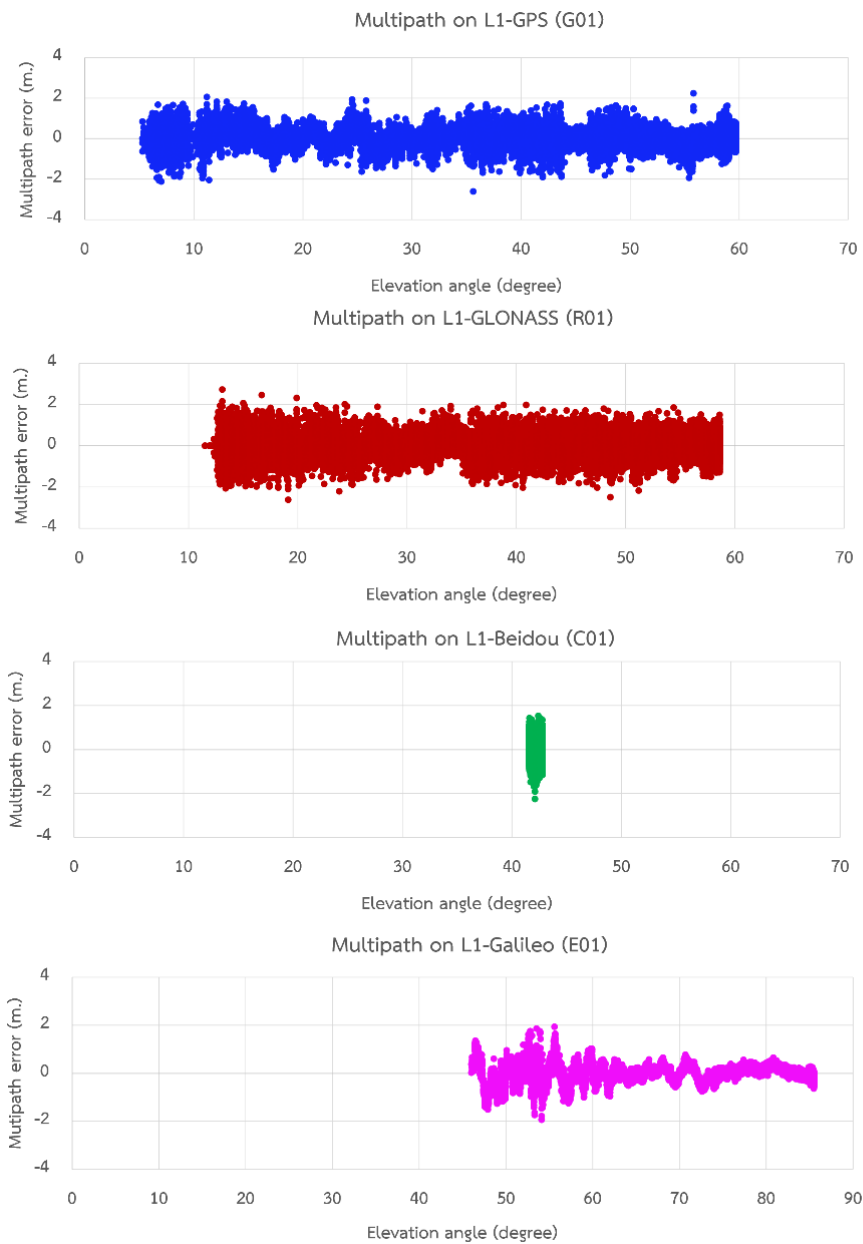
$$e_{r,ENU}^s = \begin{bmatrix} e_E \\ e_N \\ e_U \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

$$Az_r^s = ATAN2(e_E, e_N) \quad (2-7)$$

$$El_r^s = \arcsin(e_U) \quad (2-8)$$

จากสมการที่ (2-6) ถึง (2-8) $e_{r,ENU}^s$ คือ เวกเตอร์ค่ามุมสูงของพิกัด ENU จากเครื่องรับสัญญาณไปยังดาวเทียม, Az_r^s คือ ค่ามุมแอสิมัทของทิศทางดาวเทียมมีหน่วยเป็นเรเดียน และ El_r^s คือ ค่ามุมสูงของทิศทางดาวเทียมมีหน่วยเป็นองศา

ในทางทฤษฎีเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์คลื่นหลายวิถีและค่ามุมสูงดาวเทียมพบว่า การรับสัญญาณจากดาวเทียมในค่ามุมสูงที่ต่ำจะมีโอกาสสูงต่อการรับสัญญาณสะท้อนจากวัตถุพื้นผิวโดยรอบและก่อให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนมากกว่าการรับสัญญาณจากดาวเทียมในค่ามุมสูงที่สูง ดังนั้นในวิธีพื้นฐานนิยมใช้การตัดสัญญาณในค่ามุมสูงดาวเทียมที่ต่ำออก 0 ถึง 15 องศา นอกจากนี้ก็ปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อขนาดและลักษณะคลื่นหลายวิถีที่ได้รับคือความเร็วในการเคลื่อนที่ของดาวเทียมแต่ละประเภทซึ่งส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสูงและทำให้มุมรับสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลา (Fang et. al., 2015) ดังแสดงจากรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 แสดงค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีในระบบดาวเทียม GNSS

จากรูปที่ 2-6 ดาวเทียมนำร่องที่มีวงโคจรในระดับปานกลางหรือดาวเทียม MEO (Medium earth orbit) เช่น ดาวเทียม GPS GLONASS และ Galileo ซึ่งถูกใช้ในการส่งสัญญาณเพื่อนำมาใช้ในการประมวลผลหาตำแหน่งจะมีการเคลื่อนที่ไม่หยุดนิ่งและมีการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสูงตลอดเวลาในขณะที่ดาวเทียม Beidou บางดวงซึ่งใช้ประโยชน์ในด้านการสื่อสารจะมีระดับการโคจรในลักษณะวงโคจรค้างฟ้าหรือ ดาวเทียม GEO (Geostationary orbit) ซึ่งมีการเคลื่อนที่ไป

พร้อมกับการหมุนรอบตัวเองของโลกจึงเสมือนว่าโคจรอยู่กับที่ จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสูงต่ำและมีโอกาสในการรับคลื่นหลายวิธีน้อยกว่าดาวเทียมชนิดแรก

2.2.2.3 ค่า Signal-to-noise ratio หรือ ค่า SNR

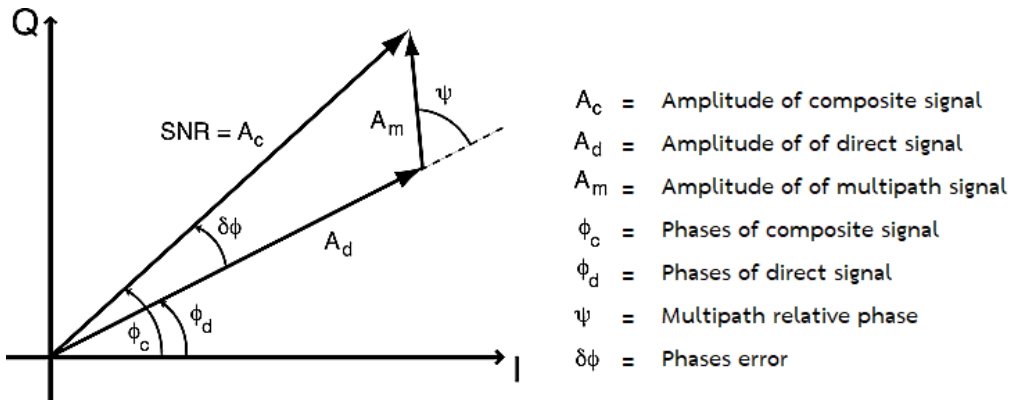
ค่า SNR คือค่าที่วัดได้จากอัตราส่วนของกำลังสัญญาณที่ได้รับต่อระดับสัญญาณรบกวน ค่า SNR สามารถใช้บ่งชี้ถึงความแรงของสัญญาณแสดงถึงคุณภาพของสัญญาณดาวเทียมที่ได้รับ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เพื่อตรวจสอบความผิดปกติของสัญญาณซึ่งมีผลจากคลื่นหลายวิธี

ในทางทฤษฎี การคำนวณค่า SNR สามารถคำนวณจากค่ากำลังสัญญาณ (Signal power) และค่าสัญญาณรบกวน (Noise) ซึ่งมีหน่วยเป็นวัตต์หรือมิลลิวัตต์โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-9) และในกรณีที่มีหน่วยเป็นเดซิเบล เช่น เดซิเบลวัตต์ (dBW) หรือเดซิเบลเมตร (dBm) สามารถคำนวณค่า SNR ได้จากสมการที่ (2-10) (Angelo, 2010)

$$SNR = 10 * \log \left(\frac{S}{N} \right) \quad (2-9)$$

$$SNR = S_{dBW} - N_{dBW} = S_{dBm} - N_{dBm} \quad (2-10)$$

อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ค่า SNR ในสัญญาณดาวเทียมจะไม่นำเรื่องค่าสัญญาณรบกวนมาพิจารณา เนื่องจากในการศึกษาและวิจัยของ Bilich et al., 2007 พบว่าค่า SNR ที่วัดได้จากเครื่องรับสัญญาณสำหรับงานสำรวจ (Geodetic receiver) ระดับของคลื่นรบกวนจะเป็นค่าคงที่ ดังนั้นค่า SNR ที่วัดได้จะสัมพันธ์กับค่าคลาดเคลื่อนจากการวัดมุมเฟสของคลื่นหลายวิธี ซึ่งสามารถแสดงจากตัวอย่างเฟสเซอร์ไดอะแกรม (Phasor diagram) ของสัญญาณดาวเทียม GPS ดังแสดงในรูปที่ 2-7



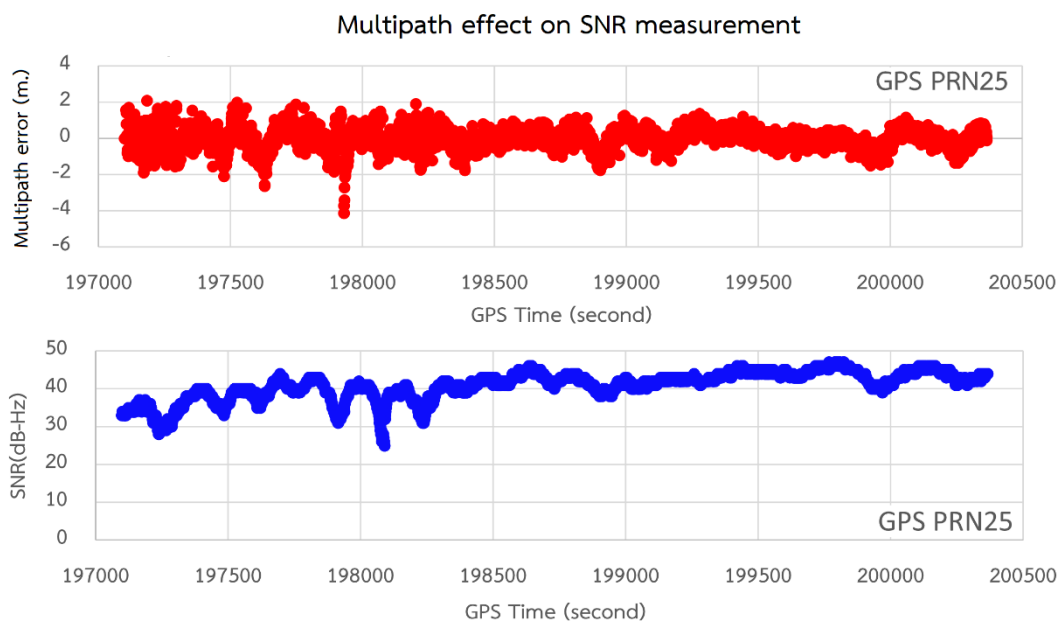
รูปที่ 2-7 แสดง Phasor diagram ของสัญญาณ GPS (Bilich et al., 2007)

จากรูปที่ 2-7 สามารถให้นิยามของค่า SNR ได้ดังนี้

$$SNR \equiv A_c^2 = A_d^2 + A_m^2 + 2A_dA_m \cos\psi \tag{2-11}$$

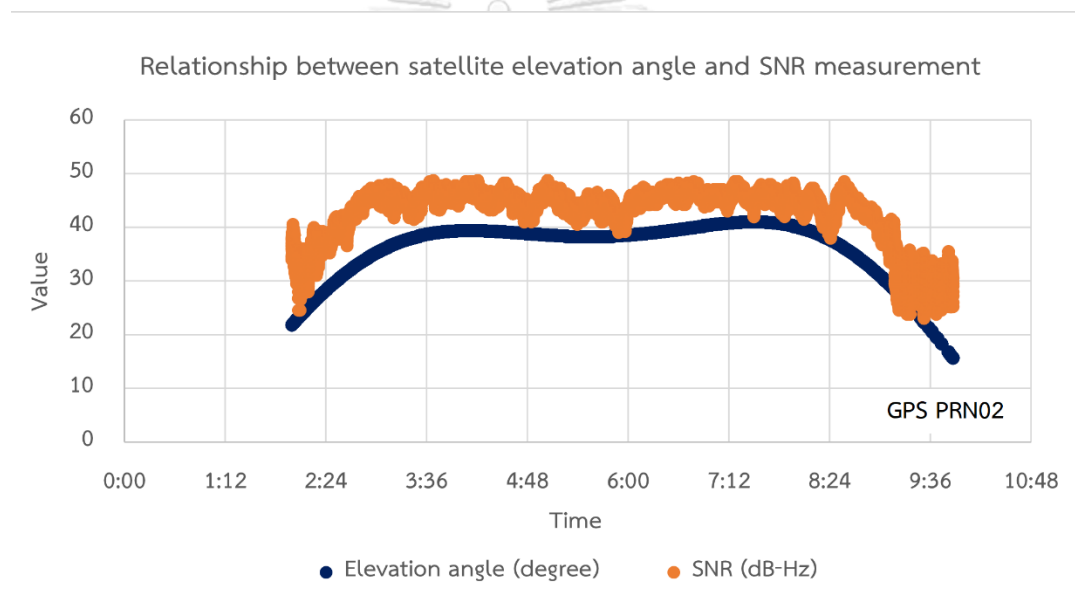
$$\tan(\delta\phi) \equiv \frac{A_m \sin\psi}{A_d + A_m \cos\psi} \tag{2-12}$$

จากสมการข้างต้นหากขนาดของค่า SNR เท่ากับขนาดค่าแอมพลิจูดของคลื่นสัญญาณคอมโพสิต (Composite signal) หรือ สัญญาณผสมระหว่างสัญญาณที่ส่งมาในทิศทางตรงและสัญญาณสะท้อนจากคลื่นหลายวิถี ดังนั้นหากค่าแอมพลิจูดของสัญญาณสะท้อนจากคลื่นหลายวิถีมีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ค่า SNR เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามเช่นกัน (รูปที่ 2-8)



รูปที่ 2-8 แสดงผลจากคลื่นหลายวิถีต่อค่า SNR

ในการตั้งรับสัญญาณบริเวณพื้นที่เปิดโล่งที่ปราศจากคลื่นหลายวิถี โดยปกติค่า SNR ที่ได้รับควรจะมีมากกว่า 42 เดซิเบลเฮิร์ต เมื่อได้รับผลจากคลื่นหลายวิถี ค่า SNR จะลดลงจากการสะท้อนกับวัตถุพื้นผิวอย่างน้อยที่สุด 1 ถึง 2 เดซิเบลเฮิร์ต หรือโดยปกติจะลดลง 3 ถึง 5 เดซิเบลเฮิร์ต (Suzuki et al., 2004) และในกรณีที่ได้รับผลจากคลื่นหลายวิถีที่รุนแรง ค่า SNR อาจลดลงสูงสุดถึง 10 เดซิเบลเฮิร์ต (Lin et al., 2018) ดังนั้นในการตรวจสอบคลื่นหลายวิถีในสัญญาณจึงสามารถพิจารณาเบื้องต้นได้จากลักษณะความผันผวนหรือความแกว่งของค่า SNR ที่เกิดขึ้น นอกจากนี้อีกปัจจัยหนึ่งที่สัมพันธ์กับค่า SNR โดยตรงคือค่ามุมสูงดาวเทียม ค่า SNR ที่วัดได้จากดาวเทียมในค่ามุมสูงที่สูงจะมีความแรงของสัญญาณมากกว่าและลักษณะของค่าที่วัดได้จะมีความคงที่มากกว่าในค่ามุมสูงที่ต่ำ (รูปที่ 2-9)



รูปที่ 2-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสูงดาวเทียมและค่า SNR

ในการนำค่า SNR มาวิเคราะห์เพื่อใช้ในการประมวลผลสัญญาณ ค่าที่วัดได้รวมถึงหน่วยของค่า SNR ที่ใช้อาจแตกต่างกันออกไปตามประเภทของเครื่องมือ ดังนั้นก่อนการนำมาใช้จึงต้องมีการการวัดสอบความถูกต้องของเครื่องมือก่อนทุกครั้ง สำหรับหน่วยของค่า SNR โดยปกติค่าจะถูกวัดในหน่วยเดซิเบล (dB) อย่างไรก็ตามในปัจจุบันเครื่องรับสัญญาณรุ่นใหม่นิยมบันทึกค่า SNR ในหน่วยเดซิเบลเฮิร์ต (dB-Hz) โดยกำหนดความกว้างของแถบคลื่นความถี่หรือแบนด์วิธ (Bandwidth) ในการบันทึกสัญญาณ เช่น ในการรับวัดแบบจุดเดี่ยวจะใช้ความถี่ 1 เฮิร์ต เป็นต้น (Špánik & Hefty, 2017)

2.3 เทคนิคตัดสัญญาณดาวเทียมเพื่อขจัดผลจากค่าคลาดเคลื่อนคลื่นหลายวิถี

2.3.1 เทคนิคที่อาศัยค่าเศษเหลือด้วยการทดสอบ RAIM-FDE

อัลกอริทึม RAIM (Receiver Autonomous integrity monitoring) เป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจสอบความคุณภาพของสัญญาณ (Integrity) จากค่าเศษเหลือที่ได้จากการวัดระยะ โดยมีสมมติฐานว่าการรับสัญญาณดาวเทียม GNSS จากหลายระบบทำให้จำนวนดาวเทียมที่รับได้มากกว่าจำนวนที่ใช้ในการคำนวณค่าตำแหน่งซึ่งส่งผลให้ข้อมูลที่วัดได้มีความซ้ำซ้อน (Redundant) และเพิ่มความเป็นไปได้ในการรับข้อมูลที่มีคุณภาพไม่ดีซึ่งมีผลจากคลื่นหลายวิถี (Hsu et al., 2016)

หลักการของ RAIM จะใช้วิธีตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency checking) โดยมีฟังก์ชันการทดสอบเพื่อตรวจจับสัญญาณที่มีปัญหาและตัดดาวเทียมที่มีปัญหาออก หรือเรียกว่า FDE (Fault detection and exclusion) เทคนิค RAIM-FDE ที่ใช้โดยทั่วไป หรือเรียกว่าเทคนิคดั้งเดิม (Conventional RAIM) จะมีหลักการทำงานแบบ Greedy search คือมีสมมติฐานว่าจะมีดาวเทียมเพียง 1 ดวงที่ผิดปกติและทำให้เกิดค่าเศษเหลือที่เป็นค่าโดด ดังนั้นจึงตัดดาวเทียมออกเพียงครั้งละ 1 ดวงในแต่ละรอบการประมวลผลแบบวนซ้ำ

ขั้นตอนการทำงานของ RAIM-FDE (รูปที่ 2-10) จะเริ่มต้นหลังจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ จากนั้นค่าเศษเหลือจากการวัดระยะจะถูกนำมาคำนวณเพื่อหาค่าผลรวมกำลังสองของค่าเศษเหลือหรือค่า SSE (Sum of square error) ดังสมการที่ (2-13) และใช้เปรียบเทียบกับค่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ หรือ ค่าเทรชโฮลด์ ตามเงื่อนไขที่แสดงในสมการที่ (2-14) ในกรณีที่ค่า SSE น้อยกว่าค่าเทรชโฮลด์ แสดงว่าไม่มีการตรวจพบดาวเทียมที่ผิดปกติ ในทางตรงข้าม หากค่า SSE มากกว่าค่าเทรชโฮลด์ แสดงว่ามีดาวเทียมที่ให้ค่าผิดปกติโดยในการเลือกตัดดาวเทียม 1 ดวงออกจะพิจารณาจากดาวเทียมที่ให้ค่า SSE มากที่สุด

$$SSE = v^T v \quad (2-13)$$

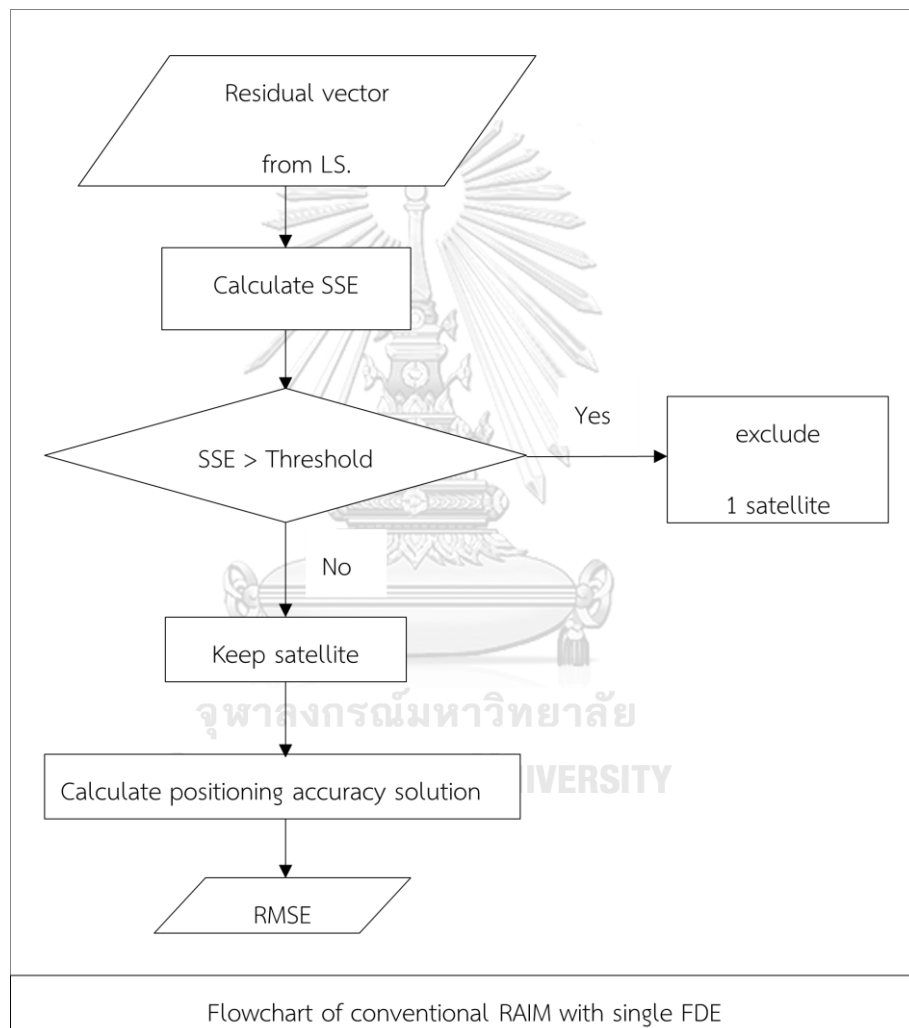
$$\frac{SSE}{DOF-1} > Threshold \quad (2-14)$$

จากเงื่อนไขในสมการที่ (2-14) ค่า DOF หรือ Degree of freedom ซึ่งเป็นเสมือนค่าชดเชยความผิดพลาดของข้อมูล (คำนวณได้จากผลต่างระหว่างจำนวนสมการค่าสังเกตหรือจำนวนดาวเทียมทั้งหมดที่รับได้และจำนวนค่าพารามิเตอร์) ถูกกำหนดให้ลบออกด้วย 1 เนื่องจากมีการตัดดาวเทียมออกครั้งละ 1 ดวง ในขณะที่ค่าเทรชโฮลด์ เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบทางสถิติด้วย ไคส

แควร์ (Chi-square test statistic) ตามสมการที่ (2-15) เนื่องจากข้อสมมติฐานที่ว่าค่าเศษเหลือชุดเรจน์เป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติและมีค่าเฉลี่ยของค่ารบกวนเท่ากับศูนย์

$$1 - P_{fa} = \frac{1}{(DOF/2)} \int_0^{CT^2} e^{-s} s^{\frac{DOF}{2}} ds \quad (2-15)$$

จากสมการที่ (2-15); P_{fa} คือ ค่าความเป็นไปได้ที่จะตรวจจับผิดพลาด (Possible of false- alarm) ซึ่งค่าความเป็นไปได้ที่จะผ่านเกณฑ์ หรือ ค่านัยสำคัญทางสถิติจะเท่ากับ $1 - P_{fa}$



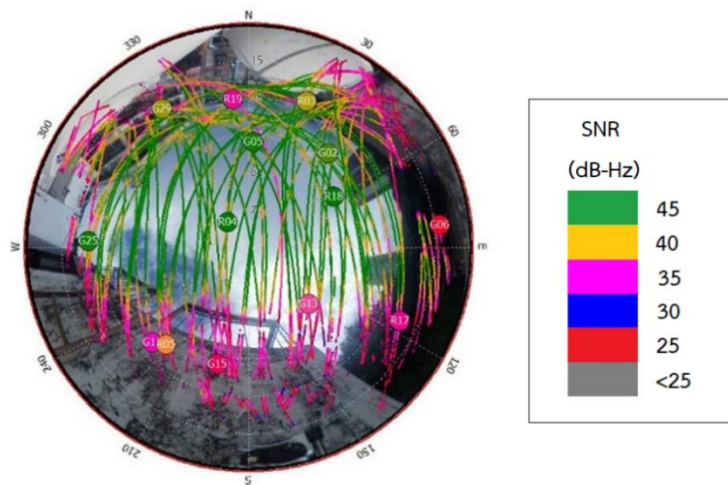
รูปที่ 2-10 แสดงแผนผังการทำงานของเทคนิค RAIM

2.3.2 เทคนิคที่อาศัยค่ามุมสูงดาวเทียม

สำหรับการรังวัดแบบจุดเดียวที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของเครื่องรับสัญญาณ การระบุดาวเทียม NLOS ซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการรับคลื่นหลายวิถี สามารถทำได้โดยการซ้อนทับข้อมูลค่าสังเกตดาวเทียมกับภาพถ่ายท้องฟ้าเหนือเครื่องรับสัญญาณ (รูปที่ 2-11) โดยภาพถ่ายที่นิยมนำมาใช้จะถูก

ถ่ายด้วยเลนส์ฟิชอายซึ่งมีข้อได้เปรียบคือ สามารถเก็บภาพได้กว้างและครอบคลุมตั้งแต่ 180 ถึง 360 องศา ดังนั้นจึงสามารถแสดงความหนาแน่นของวัตถุทั้งหมดที่เป็นอุปสรรคต่อการมองเห็นดาวเทียม นอกจากนี้ภาพแบบฟิชอายยังเหมาะสมในการใช้แสดงข้อมูลแนวทางการโคจรของดาวเทียม (Skyplot) ที่แสดงในระบบค่าพิกัดแบบขั้ว (Polar Coordinate) หรือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางกำเนิด แสดงในรูปแบบของค่ามุมสูงดาวเทียมและมุมที่วัดเทียบกับแนวทิศเหนือตามเข็มนาฬิกาหรือมุมแอสิมัท (Suzuki & Kubo, 2015)

MARKER: AUM1
REC: TRIMBLE R7 GNSS 4.17 5048K19028
ANT: TRM55971.00 NONE



รูปที่ 2-11 แสดงการตรวจสอบชนิดดาวเทียมด้วยภาพถ่ายแบบฟิชอาย อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดของเลนส์ฟิชอาย ที่ทำให้ภาพที่ได้มีความบิดเบี้ยวของภาพสูง ดังนั้นจึงต้องทำการปรับแก้ทางตำแหน่งและเรขาคณิตภาพก่อนนำมาใช้ โดยการปรับแก้ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

1) การแปลงเส้นโครงแผนที่ (Projection transformation): เพื่อให้ภาพอยู่ในระบบพิกัดเดียวกันกับค่าพิกัดตำแหน่งดาวเทียม จะต้องแปลงให้อยู่ในอยู่ในระบบพิกัดทรงกลมโดยใช้เส้นโครงแผนที่แบบระยะเท่า (Equidistant projection)

2) การหมุนภาพ (Orientation): ทำโดยใช้วิธีการหมุนภาพรอบแกนหลัก X-Y-Z ซึ่งเป็นวิธีที่แสดงว่าวัตถุเอียงทำมุมกับแกนอ้างอิงหรือ แกน XYZ ในระบบค่าพิกัดฉากอย่างไร โดยมีการหมุนมุมตามลำดับดังนี้

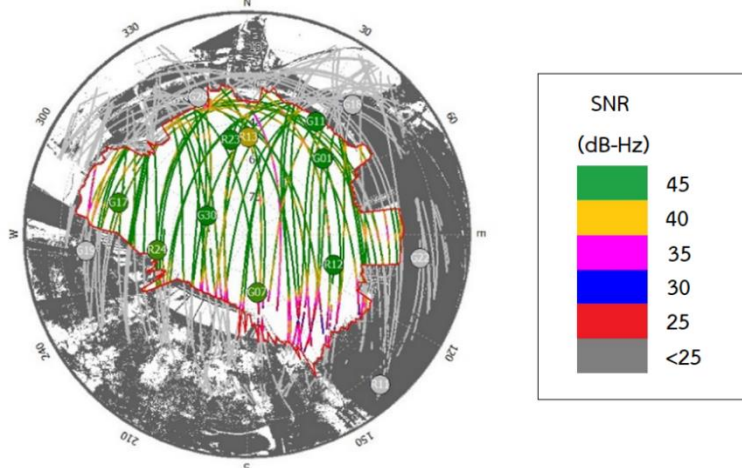
- มุม Row หมุนรอบแกน x ผลทำให้ภาพเลื่อนไปทางซ้ายหรือขวา
- มุม Pitch หมุนรอบแกน y ผลทำให้ภาพเลื่อนขึ้นหรือลง

- มุม Yaw หมุนรอบแกน z ผลทำให้ภาพหมุนตามหรือทวนเข็มนาฬิกา

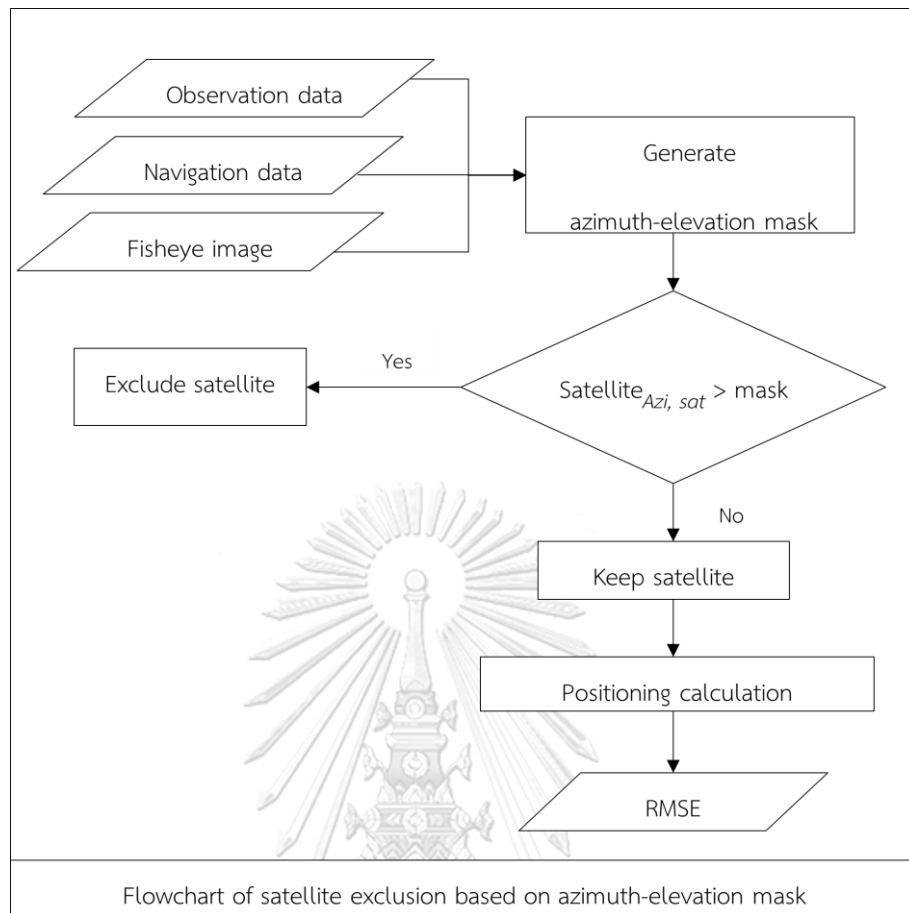
3) การประมวลผลภาพไบนารี (Image binarization): การแปลงภาพให้อยู่ในลักษณะสีขาวและสีดำเพื่อแยกประเภทวัตถุออกจากกันด้วยระดับความสว่าง โดยพื้นที่ที่สว่าง (สีขาว) แสดงวัตถุในภาพที่เป็นท้องฟ้า ในขณะที่พื้นที่ที่มืด (สีดำ) แสดงถึงวัตถุสิ่งของ

ในการตัดดาวเทียมตามค่ามุมสูงดาวเทียมโดยอาศัยภาพพิชอาย เมื่อทำการปรับแก้ภาพและซ้อนทับภาพกับข้อมูลดาวเทียม ดาวเทียม NLOS และ LOS จะถูกแยกออกจากกันอย่างชัดเจนโดยเส้นแบ่งขอบเขตพื้นที่ท้องฟ้าและวัตถุ หรือ เรียกว่า Mask (ภาพที่ 2-12) ตำแหน่งของเส้น Mask จะประกอบด้วยค่ามุมสูงดาวเทียมในแต่ละค่ามุมแอซิมัท ซึ่งแสดงทิศทางของสัญญาณจากดาวเทียมมายังเครื่องรับสัญญาณ หากดาวเทียมดวงใดอยู่นอกขอบเขตเส้น mask จะถูกตัดออกในทุกขณะเวลาที่ทำการรับสัญญาณ

MARKER: AUM1
REC: TRIMBLE R7 GNSS 4.17 5048K19028
ANT: TRM55971.00 NONE



รูปที่ 2-12 แสดงการสร้าง Mask จากการซ้อนภาพถ่ายแบบพิชอาย



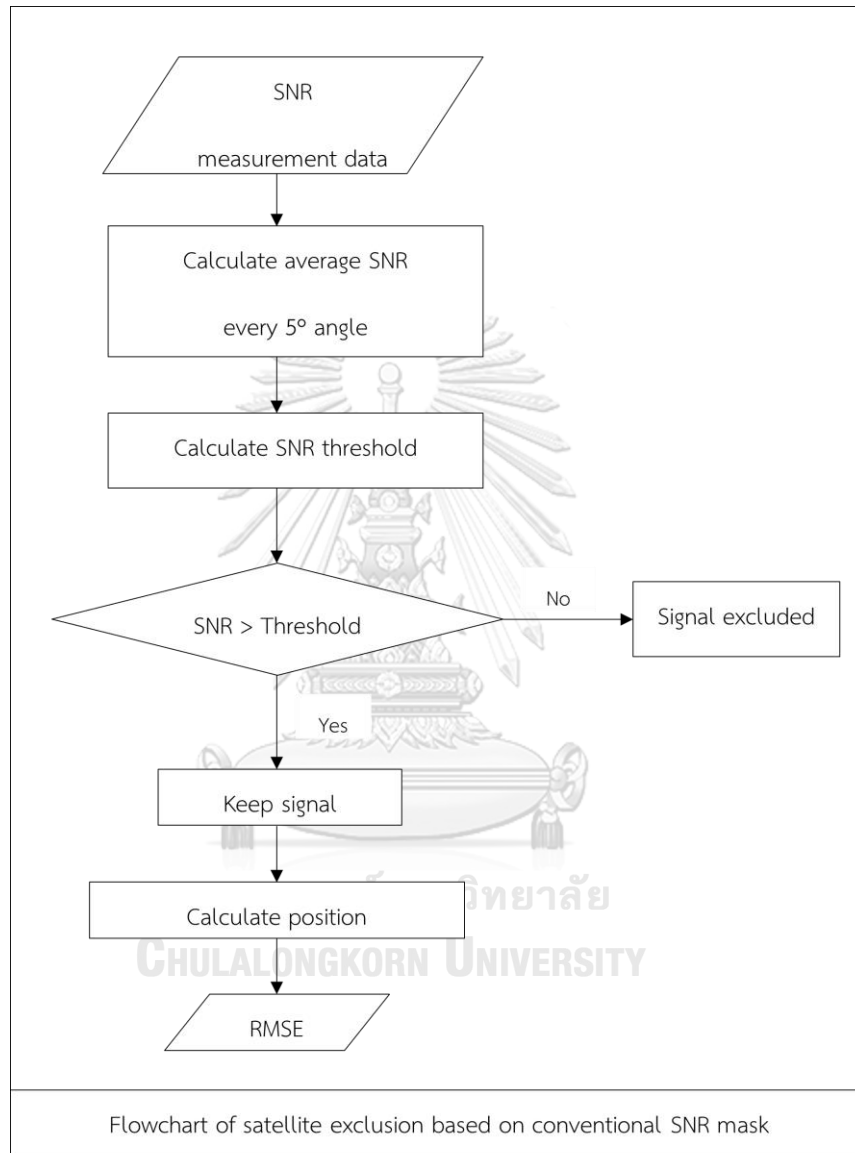
รูปที่ 2-13 แสดงแผนผังการทำงานของเทคนิคที่อาศัยภาพแบบฟิชอาย

2.3.3 เทคนิคที่อาศัยค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม

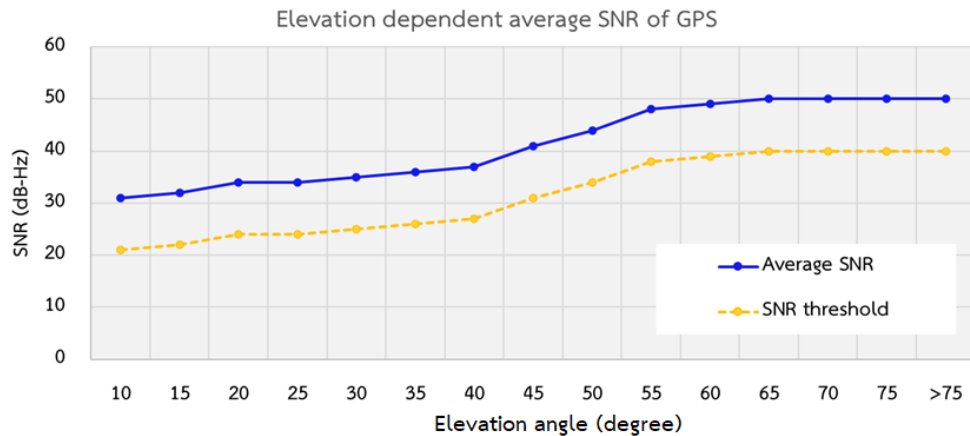
การตัดสัญญาณดาวเทียมโดยใช้ค่าคงที่ของค่า SNR แม้ว่าจะสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดจากการตัดค่า SNR เท่ากันในทุกค่ามุมสูงทำให้มีสัญญาณจำนวนมากถูกตัดออก ซึ่งส่งผลต่อจำนวนสัญญาณดาวเทียมคงเหลือในการประมวลผล, ค่าเรขาคณิตดาวเทียมและค่าความถูกต้องตำแหน่งที่ได้รับ

โดยใช้พิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสูงดาวเทียมและค่า SNR พบว่าโดยทั่วไปการรับสัญญาณจากดาวเทียมในค่ามุมสูงที่สูงจะทำให้ค่า SNR ที่ได้รับมากกว่าสัญญาณจากค่ามุมสูงที่ต่ำ นอกจากนี้ ค่า SNR ของสัญญาณที่ได้รับจากแต่ละระบบดาวเทียมย่อมมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นโดยใช้หลักการนี้ วิธีตัดสัญญาณโดยอาศัยค่า SNR ที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละระบบดาวเทียมและค่ามุมสูงดาวเทียมจะสามารถให้ผลที่มีประสิทธิภาพในการลดคลื่นหลายวิถีได้มากกว่า (Shirai & Nobuaki, 2011; Suzuki, 2011; Tokura, 2016; Tokura & Nobuaki, 2014, 2017)

ขั้นตอนในการตัดดาวเทียมแสดงในรูปที่ 2-14 โดยประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การคำนวณค่าเฉลี่ยของค่า SNR, การทดสอบหาค่าเทรชโฮลด์ ที่เหมาะสม และการตัดสัญญาณดาวเทียมออกตามเงื่อนไขที่กำหนด



รูปที่ 2-14 แสดงแผนผังการทำงานของเทคนิคที่อาศัยค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม ในการคำนวณหาค่าเฉลี่ย ค่า SNR ที่วัดได้จากดาวเทียมในแต่ละระบบจะถูกนำมาจัดกลุ่มตามช่วงค่ามุมสูงดาวเทียมทุก 5 องศาเพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ย จากนั้นเมื่อกำหนดค่าเทรชโฮลด์ เพื่อใช้ลบออกจากค่าเฉลี่ยจะได้ค่าเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสัญญาณดาวเทียม (รูปที่ 2-15) สัญญาณดาวเทียมที่มีค่า SNR ที่วัดได้จริงน้อยกว่าค่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จะถูกตัดออกและไม่ใช้ในการประมวลผลค่าตำแหน่ง

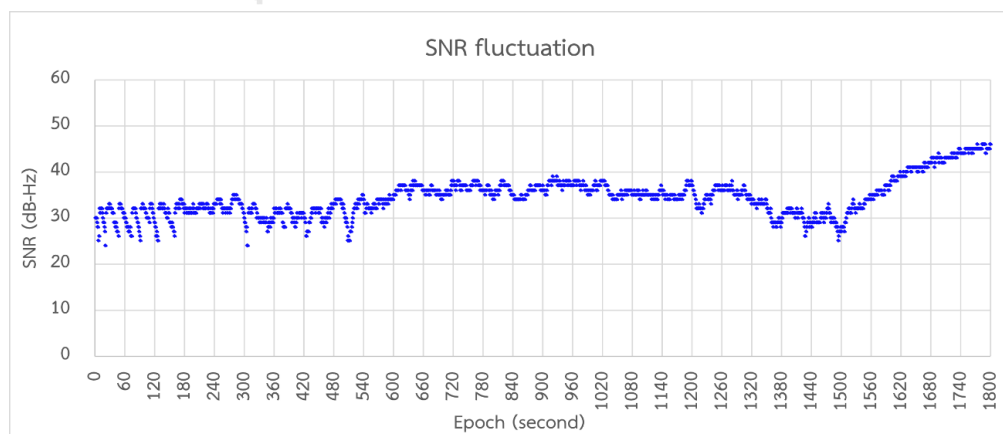


รูปที่ 2-15 แสดงการสร้างค่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้จากค่าเฉลี่ยของค่า SNR

โดยปกติค่าเทรซโฮลด์ จะมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ย 6 ถึง 8 เดซิเบลเอิร์ท อย่างไรก็ตามค่าเทรซโฮลด์ ที่เหมาะสมอาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อมูล เช่น ระยะเวลา สภาพแวดล้อม และเครื่องมือในการรับสัญญาณ ดังนั้นเพื่อทดสอบหาค่าเทรซโฮลด์ ที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาผลจากค่าความถูกต้องทางตำแหน่งโดยใช้ค่า RMSE และค่าเรขาคณิตดาวเทียม GDOP

2.3.4 เทคนิคที่อาศัยขนาดความผันผวนของค่า SNR

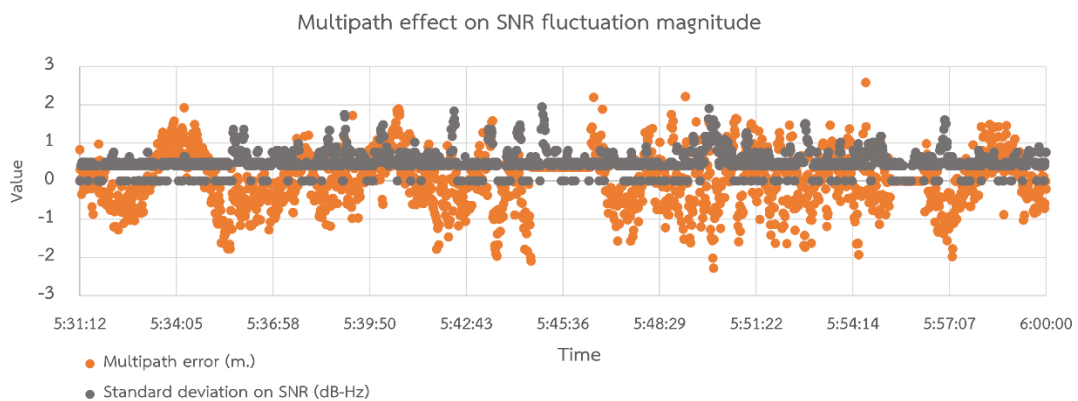
การผันผวนของค่า SNR หรือ ลักษณะของค่าที่วัดได้มีความแกว่งขึ้น-ลง มักเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมรับสัญญาณโดยเฉพาะจากการรับสัญญาณสะท้อนจากคลื่นหลายวิถี ดังแสดงในรูปที่ 2-16 ในทางตรงข้ามการรับสัญญาณในสภาพแวดล้อมที่เปิดโล่งหรือปราศจากคลื่นหลายวิถี ค่า SNR ที่วัดได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จะมีความคงที่และมีการเปลี่ยนแปลงน้อย



รูปที่ 2-16 แสดงผลจากคลื่นหลายวิถีต่อการผันผวนของค่า SNR

ช่วงระยะเวลาความผันผวนของค่า SNR ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ประเภทของดาวเทียม, ระยะเวลาในการรับสัญญาณ, ขนาดของคลื่นหลายวิถี, คุณภาพของเสาอากาศรับสัญญาณ

หรือการเคลื่อนที่ของเสาอากาศ เป็นต้น จากการศึกษาในงานวิจัยของ Fang et al, 2015 และ Tokura and Kubo, 2016; 2017 พบว่าเมื่อขนาดของคลื่นหลายวิถีสัมพันธ์กับขนาดค่าความผันผวนของค่าความแรงสัญญาณ ดังแสดงจากรูปที่ 2-17 และขนาดความผันผวนของสัญญาณสามารถบ่งชี้ได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในช่วงระยะเวลาที่กำหนด ดังนั้นโดยใช้เทคนิคการตัดสัญญาณด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่จะสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการตัดสัญญาณโดยพิจารณาจากค่ามุมสูงดาวเทียม ซึ่งอาจมีความเป็นไปได้ที่การรับคลื่นหลายวิถีจะมาจากดาวเทียมในค่ามุมสูงที่สูง



รูปที่ 2-17 แสดงขนาดคลื่นหลายวิถีและขนาดความผันผวนของค่า SNR ขั้นตอนในการตัดสัญญาณดาวเทียมแสดงในรูปที่ 2-18 โดยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า SNR สามารถคำนวณได้ดังนี้

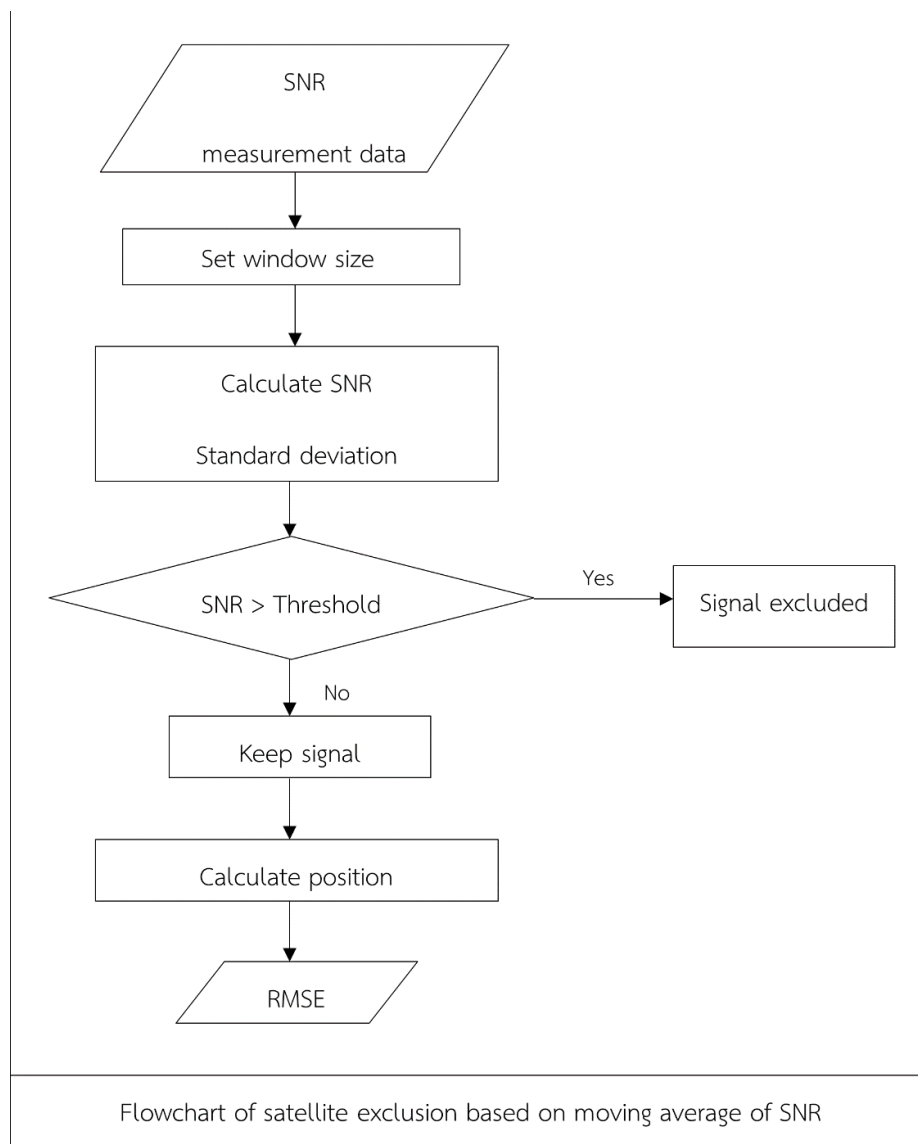
$$std(SNR)_T = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (SNR_i - SNR_{est})^2} \quad (2-16)$$

เมื่อ N = จำนวนข้อมูลค่า SNR ทั้งหมดในช่วงเวลา T
 T = ขนาดมูฟวิงวินโดว์หรือกรอบเวลาที่กำหนด (Time window)
 SNR_i = ข้อมูลค่า SNR ที่วัดได้จริงใน Epoch ที่ i
 SNR_{est} = ค่าเฉลี่ยของค่า SNR ในช่วงเวลา T

ในการตัดสัญญาณดาวเทียมจะพิจารณาโดยใช้เงื่อนไขดังนี้

$$std(SNR)_T > SNR_{Thres} \quad (2-17)$$

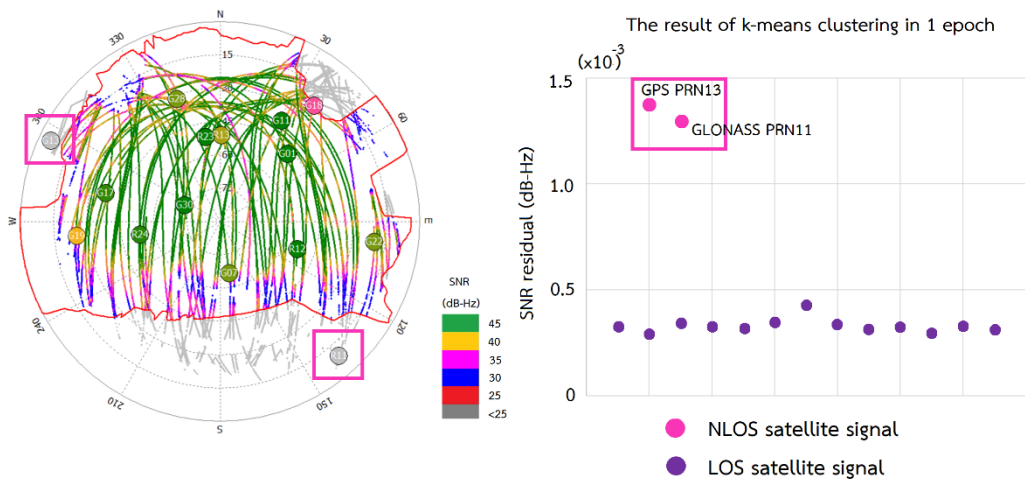
จากเงื่อนไขข้างต้นเมื่อกำหนดค่าเทรชโฮลด์ ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า SNR ที่เหมาะสม หากสัญญาณจากดาวเทียมดวงใดมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากกว่า Threshold ที่กำหนด จะถูกตัดออกทั้งหมดในมูฟวิงวินโดว์นั้น อย่างไรก็ตามขนาดของมูฟวิงวินโดว์และค่าเทรชโฮลด์ ที่กำหนดมีผลต่อค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้รับ ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบหาเหมาะสมที่สุดก่อนนำมาประมวลผล



รูปที่ 2-18 แสดงแผนผังการทำงานของเทคนิคที่อาศัยขนาดความผันผวนของค่า SNR

2.3.5 เทคนิคที่อาศัยการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือของค่า SNR ด้วยวิธี K-means

เทคนิคนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตัดสัญญาณจากดาวเทียม NLOS โดยพิจารณาจากผลการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือของค่า SNR ดังแสดงในรูปที่ 2-19 หากใช้สมมติฐานว่าค่าเศษเหลือแสดงถึงความคลาดเคลื่อนที่ยังหลงเหลืออยู่ในข้อมูล ดังนั้นค่าเศษเหลือของค่า SNR ย่อมสามารถแสดงถึงความผิดปกติของสัญญาณได้เช่นกัน



รูปที่ 2-19 แสดงการตรวจจับสัญญาณจากดาวเทียม NLOS จากค่าเศษเหลือของค่า SNR สำหรับขั้นตอนในการประมวลผลแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ การคำนวณค่าเศษเหลือของค่า SNR และการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือด้วยอัลกอริทึม K-means

1) การคำนวณค่าเศษเหลือของค่า SNR ด้วยสมการลิทสแควร์

โดยปกติขนาดของค่า SNR จะสัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม คือ ค่า SNR ที่ได้รับจากดาวเทียมในค่ามุมสูงจะมากกว่าในค่ามุมสูงที่ต่ำ ดังนั้นเพื่อที่จะคำนวณหาค่าเศษเหลือของค่า SNR จึงจะอาศัยสหสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างแบบจำลองสโตรคาสติกที่ขึ้นกับค่ามุมสูงดาวเทียมและแบบจำลองที่ขึ้นกับค่ามุมสูงดาวเทียมดังแสดงในสมการที่ (2-18) และ (2-19) ตามลำดับ

$$\sigma^2 = \frac{a^2 + b^2}{\sin^2 E} \quad (2-18)$$

$$\sigma^2 = B \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right) * 10^{-\frac{SNR}{10}} \quad (2-19)$$

จากสมการข้างต้น เมื่อ σ^2 คือ ค่าความแปรปรวนจากการวัดเฟสคลื่นส่ง, a และ b คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, E คือ ค่ามุมสูงดาวเทียม, B คือ แบนด์วิธของข้อมูลเฟสคลื่นส่ง และ λ คือ ความยาวคลื่น ดังนั้นเมื่อตั้งสมมติฐานว่าสหสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทั้งสองมีลักษณะเป็น

สมการเชิงเส้น และจัดให้อยู่ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการค่าสังเกตจะสามารถแสดงได้ ดังนี้ (Lin et al., 2018)

$$10^{-\frac{SNR^n}{10}} = \frac{1}{B} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) * \frac{a^2 + b^2}{\sin^2 E(n)} + \varepsilon(n) \quad (2-20)$$

จากสมการที่ (2-20) ; เมื่อกำหนดให้ n คือ จำนวนดาวเทียมที่รับได้ทั้งหมด และ ε คือ ค่าคลาดเคลื่อนระหว่างของค่าประมาณของค่า SNR กับค่าจริงที่วัดได้ของดาวเทียมดวงที่ i ดังนั้นเมื่อจัดให้อยู่ในรูปแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่าด้วยลิสต์สแควร์จะแสดงได้ดังนี้

$$\Delta y = H * \Delta x + \varepsilon \quad (2-21)$$

$$\text{โดยที่ } y = \begin{bmatrix} 10^{-\frac{SNR^{(1)}}{10}} \\ \vdots \\ 10^{-\frac{SNR^{(n)}}{10}} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} \frac{\partial(10^{-\frac{SNR^{(1)}}{10}})}{\partial a} & \frac{\partial(10^{-\frac{SNR^{(1)}}{10}})}{\partial b} & \frac{\partial(10^{-\frac{SNR^{(1)}}{10}})}{\partial B} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial(10^{-\frac{SNR^{(n)}}{10}})}{\partial a} & \frac{\partial(10^{-\frac{SNR^{(n)}}{10}})}{\partial b} & \frac{\partial(10^{-\frac{SNR^{(n)}}{10}})}{\partial B} \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} a \\ b \\ B \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (2-21) ; เมื่อกำหนดให้ y คือ เวกเตอร์ของข้อมูลค่า SNR ซึ่งมีขนาด n มิติ, H คือ เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของค่าสังเกตขนาด $n \times 3$ และ x คือ เวกเตอร์ค่าสัมประสิทธิ์ขนาด $n \times 3$ และ ε คือ เวกเตอร์เศษเหลือของค่า SNR ขนาด $n \times 1$

ผลจากการปรับแก้ด้วยวิธีลิสต์สแควร์ เวกเตอร์ค่าประมาณของค่า SNR หรือ \hat{y} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-22)

$$\hat{y} = H(H^T H)^{-1} H^T y \quad (2-22)$$

เมื่อคำนวณหาค่าต่างระหว่างค่าประมาณ (\hat{y}) และค่าที่วัดได้จริง (y) จะได้ เวกเตอร์ค่าเศษเหลือของค่า SNR หรือ w โดยค่าผลรวมของค่าเศษเหลือกำลังสองหรือ ค่า SSE ของ เวกเตอร์ค่าประมาณสามารถคำนวณได้จากด้วยสมการที่ (2-23)

$$SSE = w^T w \quad (2-23)$$

เมื่อค่า SSE มากกว่าค่าเทรซโฮลด์ ที่กำหนดตามเงื่อนไข $\frac{SSE}{\sigma_0^2} > T^2$ แสดงว่ามี การตรวจพบสัญญาณจากดาวเทียม NLOS

2) การจัดกลุ่มค่าเศษเหลือของค่า SNR ด้วยวิธี K-Means

เทคนิคการจัดกลุ่มด้วยอัลกอริทึม K-means clustering นิยมใช้ในการประมวลผลสัญญาณเพื่อจำแนกชนิดของสัญญาณ เนื่องจากเป็นเทคนิคจัดกลุ่มการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised classification) ที่เหมาะกับการจัดกลุ่มค่าตัวแปรเชิงปริมาณที่ไม่สามารถกำหนดเกณฑ์ในการจัดคลาสประเภทหรือไม่ทราบจำนวนกลุ่มของข้อมูลล่วงหน้า นอกจากนี้วิธี K-means สามารถทำงานได้ดีในข้อมูลที่มีการเกาะกลุ่ม โดยใช้การวิเคราะห์กลุ่มแบบไม่เป็นขั้นตอน (Nonhierarchical cluster-analysis) หรือการแบ่งส่วน (Partitioning) ทำให้กลุ่มถูกแยกออกชัดเจน โดยไม่มีกลุ่มใดทับซ้อนกัน

หลักการของวิธี K-means คือการแบ่งข้อมูลโดยอาศัยความคล้ายกันของข้อมูลในกลุ่ม โดยพิจารณาจากระยะระหว่างข้อมูลและค่ากึ่งกลาง (Mean) ของแต่ละกลุ่ม ข้อมูลจะถูกจัดเข้ากลุ่มที่อยู่ใกล้ที่สุด จนกระทั่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงกลุ่มจึงถือว่าสิ้นสุดกระบวนการ ขั้นตอนการจัดกลุ่มด้วย K-means ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. กำหนดจำนวนกลุ่มของข้อมูลเป็น k กลุ่ม ซึ่งในการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือของค่า SNR จะใช้สมมติฐานว่าการรับสัญญาณมาจากดาวเทียม 2 กลุ่มคือ LOS และ NLOS ดังนั้นค่า k จึงกำหนดเท่ากับ 2 และเซตของข้อมูล 2 กลุ่มกำหนดเท่ากับ $S = \{s_1, s_2\}$

2. คำนวณหาจุดศูนย์กลางของแต่ละกลุ่มคือ c_1 และ c_2 โดยวิธี K-means จะใช้การกำหนดค่าเริ่มต้นของศูนย์กลางกลุ่มแบบสุ่ม

3) มีขั้นตอนการพิจารณาแบ่งกลุ่มใน 2 ทางเลือกดังนี้

- ข้อมูล SNR ทั้งหมดจำนวน n ตัวจะถูกนำมาคำนวณระยะห่างกำลังสองจากศูนย์กลางกลุ่มด้วยวิธีหาระยะแบบ Euclidean distance โดยค่ากำลังสองของระยะที่คำนวณได้เรียกว่าค่าผลรวมกำลังสองภายในกลุ่มหรือ WCSS (Within-cluster sum of squares) สามารถได้แสดงจาก $\sum_{i=1}^k \sum_{p \in X_i} \|p - m_i\|^2$ จากนั้นข้อมูลจะทำการเลือกกลุ่มที่จะทำให้ค่า WCSS ของกลุ่มนั้นมีค่าน้อยที่สุดตามเงื่อนไขในสมการที่ 2-24 (เนื่องจากผลรวมของค่า WCSS เป็นค่ากำลังสองของระยะแบบยุคลิด จึงถือเป็นค่าเฉลี่ยที่ใกล้ที่สุด)

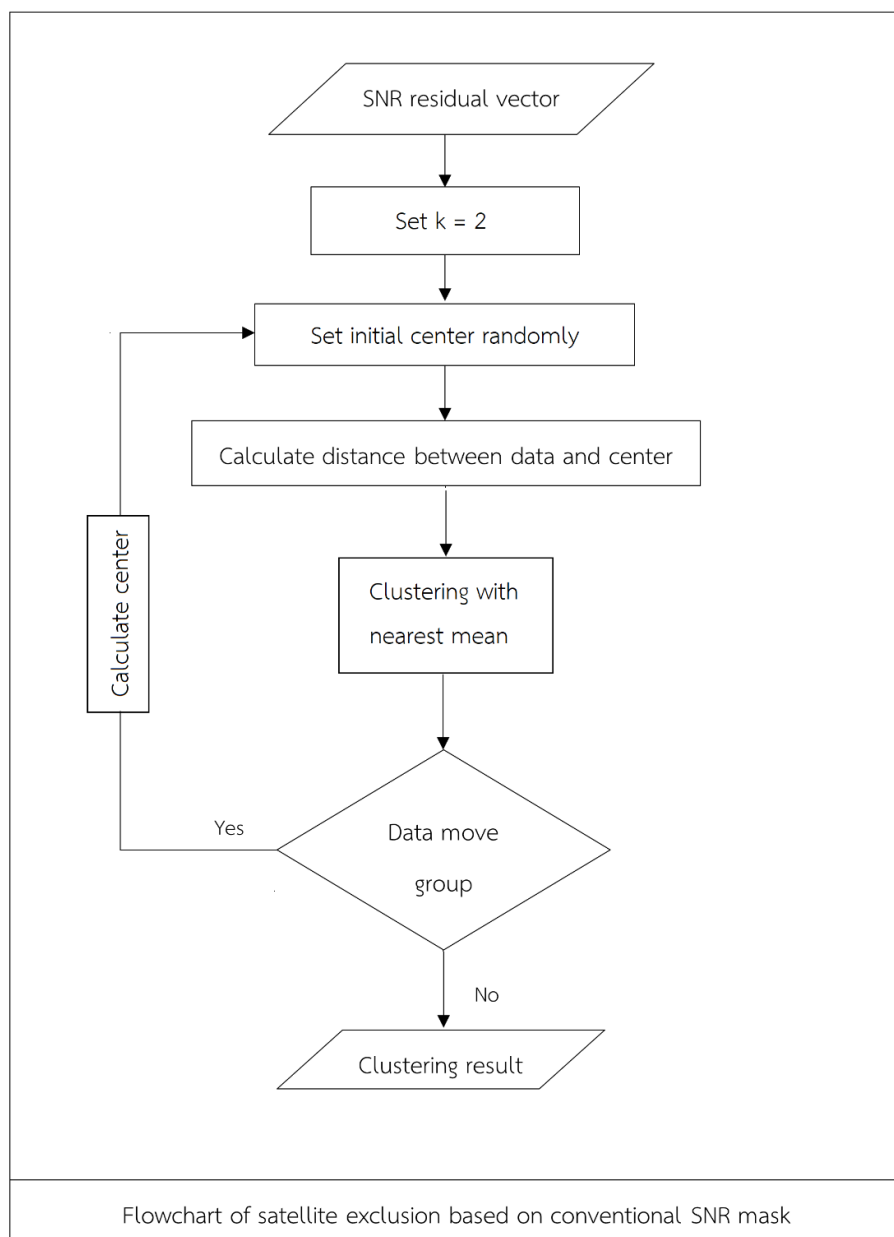
$$S_k = \{p : \|p - m_i\|^2 \leq \|p - m_j\|^2 \forall j, 1 \leq j \leq k\} \quad (2-24)$$

- คำนวณค่าเฉลี่ยค่าใหม่เพื่อเป็นจุดศูนย์กลางของกลุ่มถัดไปดังนี้

$$m_i = \frac{1}{|S_k|} \sum_{p \in X_i} p$$

(2-25)

การประมวลผลจะเป็นแบบวนซ้ำภายในขั้นตอนที่ 3 จนกระทั่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงของศูนย์กลางกลุ่มจึงถือว่าการจัดกลุ่มเสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 2-20 แสดงแผนผังการทำงานของวิธี K-means clustering

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ในการขจัดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีจากการหาตำแหน่งแบบจุดเดียวโดยใช้ข้อมูลรังวัดจากระบบดาวเทียม GNSS ซึ่งสามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมได้จำนวนมาก นิยมใช้วิธีการเลือกหรือตัดสัญญาณจากดาวเทียมที่ไม่มีคุณภาพออก โดยอาศัยการกรองข้อมูลค่าสังเกตจากค่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งคำนวณจากค่าพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับขนาดและลักษณะของคลื่นหลายวิถีรวมถึงสัญญาณจากดาวเทียม NLOS ซึ่งได้แก่ ค่าเศษเหลือจากการวัดระยะซูดเรนจ์, ค่ามุมสูงของดาวเทียม และค่าอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน หรือ ค่า SNR ซึ่งวิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่าเทคนิคอื่นคือ ข้อมูลค่าพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถคำนวณได้จากข้อมูลค่าสังเกตดาวเทียมที่รังวัดได้ ดังนั้นจึงไม่ต้องอาศัยการเก็บข้อมูลภายนอกเพิ่มเติม

ในการกรองสัญญาณที่มีผลจากคลื่นหลายวิถีโดยอาศัยข้อมูลค่าเศษเหลือซูดเรนจ์ จะใช้หลักการตรวจสอบความสอดคล้องของผลลัพธ์ค่าตำแหน่งที่ได้รับ โดยเทคนิคหนึ่งที่ยอมรับนำมาใช้ คือ เทคนิค RAIM หรือ ระบบการตรวจสอบคุณภาพของสัญญาณ ซึ่งถูกติดตั้งภายในเครื่องรับสัญญาณคุณภาพสูง อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้สามารถนำมาใช้ภายหลังการประมวลผลค่าตำแหน่งได้ ในเทคนิค RAIM แบบพื้นฐานหรือเทคนิคแบบดั้งเดิม จะเลือกตัดสัญญาณที่มีความผิดปกติจากค่าผลรวมของค่าเศษเหลือ หรือ ค่า SSE ที่มากที่สุดและมีความมากกว่าค่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้เพียง 1 ดวงเพื่อตัดออกจากการประมวลผลแบบวนซ้ำในแต่ละรอบ ซึ่งค่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้จะคำนวณจากการทดสอบทางสถิติด้วยไคสแควร์ ซึ่งในงานวิจัยของ Wang et al. (2012) ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิค RAIM เบื้องต้นโดยสร้างสัญญาณจำลองของดาวเทียม GPS ใน 2 ลักษณะ ได้แก่ สัญญาณที่ปราศจากคลื่นหลายวิถี และ สัญญาณที่มีผลจากคลื่นหลายวิถี ผลการทดสอบพบว่า หากประมวลผลด้วยข้อมูลที่ปราศจากคลื่นหลายวิถี เมื่อสิ้นสุดการทำงานของ RAIM ค่า SSE ที่คำนวณในทุกรอบการประมวลผล จะมีค่าน้อยกว่าค่า Chi-square threshold ซึ่งหมายความว่า ไม่มีการตรวจพบดาวเทียมที่ผิดปกติ ในทางตรงข้ามเมื่อทดสอบกับข้อมูลที่มีคลื่นหลายวิถี ผลพบว่ามีค่า SSE มากกว่าค่าเทรชโฮลด์ แสดงถึงการตรวจสอบพบดาวเทียมที่ผิดปกติ และ RAIM สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพถูกต้อง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของ Blanch et al. (2015) ได้ทำการทดสอบโดยใช้ข้อมูล GNSS จากดาวเทียมมากกว่า 1 ระบบและพบว่า เทคนิค RAIM แบบดั้งเดิมไม่สามารถตัดดาวเทียมที่ไม่มีคุณภาพออกได้หมด เนื่องจากดาวเทียมที่มีปัญหามีมากกว่า 1 ดวง จึงทำให้ไม่สามารถลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีออกได้หมด

เนื่องจากวิธีการตรวจสอบสัญญาณจากค่าเศษเหลือสามารถทำได้ในขั้นตอนหลังการประมวลผลค่าตำแหน่ง ดังนั้นจึงมีการศึกษาและพัฒนาวิธี เพื่อที่จะสามารถตรวจสอบและจัดคลื่นหลายวิถีในสัญญาณในขั้นตอนก่อนการประมวลผลค่าตำแหน่ง ซึ่งเทคนิคหนึ่งที่น่าเชื่อถืออย่างแพร่หลายและให้ผลที่มีประสิทธิภาพคือ การตรวจจับดาวเทียม NLOS ซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการรับคลื่นหลายวิถี ด้วยการประยุกต์ใช้ภาพท้องฟ้าในลักษณะพิกซอลซ้อนทับกับข้อมูลค่าสังเกตดาวเทียมที่ได้รับ จุดเด่นของวิธีนี้คือ สามารถแสดงสภาพแวดล้อมจริงในเวลาเดียวกันกับข้อมูลดาวเทียมที่ได้รับ ทำให้สามารถจำแนกชนิดของสัญญาณดาวเทียม LOS และ NLOS ได้อย่างชัดเจนจากเส้นแบ่งขอบเขตพื้นที่ท้องฟ้าและวัตถุ หรือ Mask ซึ่งประกอบด้วยค่ามุมแอมพิทูดและค่ามุมสูงดาวเทียม จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามีความพยายามที่จะใช้เครื่องมือต่างๆเพื่อให้ได้มาซึ่งภาพพิกซอล เช่น การใช้กล้องอินฟราเรด 360 องศา (Suzuki et al., 2011), การสร้างแบบจำลองพิกซอลจาก Google Earth API (Suzuki & Kubo, 2015), การใช้กล้องถ่ายภาพโดยใช้เลนส์พิกซอล (Tokura et al., 2014-2017; Tongleamnak & Nagakai, 2017; Valanon et al., 2020) ซึ่งได้มีงานวิจัยที่ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ในการจำแนกชนิดดาวเทียมจากวิธีต่าง ๆ และพบว่า ผลแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 1 (Suzuki & Kubo, 2015)

เทคนิคที่อาศัยการใช้ภาพพิกซอลนิยมนำมาใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวโดยอาจที่มีการเคลื่อนที่หรือไม่เคลื่อนที่ของเครื่องรับสัญญาณได้ อย่างไรก็ตามในการทดสอบเบื้องต้นนิยมใช้การรังวัดแบบสถิตย์เนื่องจากสามารถตัดการพิจารณาถึงปัจจัยด้านความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ส่งผลต่อความต่อเนื่องในการรับสัญญาณและการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมเหนือเครื่องรับสัญญาณ ในงานวิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้เทคนิคพิกซอลเพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีในข้อมูลเฟสคลื่นส่ง เนื่องจากการสะท้อนของคลื่นหลายวิถีสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเฟสในการรับสัญญาณ โดยในงานวิจัยของ Suzuki et al. (2011) พบว่าโดยอาศัยเทคนิคนี้สามารถตัดดาวเทียม NLOS ได้เฉลี่ย 2 ดวง ต่อ 1 Epoch และลดค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ที่มากกว่า 60 เมตรในทิศทางราบได้ 0.45 เมตร ในขณะที่ในงานวิจัยของ Tokura et al. (2014) พบว่าการใช้เทคนิคพิกซอลสามารถตรวจสอบดาวเทียมที่ให้ผลจากคลื่นหลายวิถี ซึ่งมาจากดาวเทียมในค่ามุมสูงที่สูงมากกว่า 80 องศา และผลการตัดดาวเทียมออกพบว่าค่าคลาดเคลื่อนลดลงถึงร้อยละ 72.53 (2.35 เมตร) และในงานวิจัยของ Tokura & Kubo (2016) ได้ทำการสร้าง Mask ค่ามุมสูงดาวเทียมโดยอาศัยภาพพิกซอลเพื่อตัดสัญญาณ NLOS ที่อยู่นอกขอบเขต Mask ออก ผลการทดสอบพบว่าสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนเบี่ยงเบนมาตรฐานในทางราบและทางตั้งได้ในระดับเซนติเมตรหรือ

ประมาณร้อยละ 8 ถึง 10 เมื่อเปรียบเทียบผลกับวิธี RTK แบบพื้นฐานโดยกำหนดค่าเกณฑ์แบบค่าคงที่ คือ ตัดค่ามุมสูงดาวเทียมออกที่ 15 องศา และ ค่า SNR ต้องมากกว่า 30 เดซิเบลเฮิร์ต

ในงานวิจัยของ Uaratanawong et al. (2020) ได้นำเทคนิคที่อาศัยภาพฟิซายมาปรับใช้กับวิธีการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวด้วยข้อมูลชุดเรนจ์ โดยตั้งสมมติฐานว่า ถึงแม้ว่าคลื่นหลายวิถีจะไม่ได้ส่งผลกระทบต่อข้อมูลชุดเรนจ์ แต่คลื่นหลายวิถีส่งผลกระทบต่อค่าคลาดเคลื่อนจากการวัดระยะชุดเรนจ์มากกว่าเฟสคลื่นส่งเนื่องจากความยาวคลื่น ดังนั้นจึงคาดว่า การใช้เทคนิคนี้จะสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนจากการวัดระยะได้ดีกว่า จากการทดสอบเบื้องต้นด้วยข้อมูลดาวเทียมแบบ 2 ระบบคือ GPS และ GLONASS ในระยะเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าเทคนิคนี้สามารถตรวจจับและตัดดาวเทียมในลักษณะ NLOS ได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตามเนื่องจากมีการตัดสัญญาณออกจำนวนมากเป็นผลให้สัญญาณขาดหายในหลายขณะเวลาและไม่สามารถประมวลผลหาค่าตำแหน่งได้

ถึงแม้ว่าเทคนิคที่อาศัยภาพฟิซายจะมีประสิทธิภาพในการตรวจหาคลื่นหลายวิถีจากสัญญาณ NLOS อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความถูกต้องของภาพซึ่งยากต่อการตรวจสอบและปรับแก้ เช่น แสงและสีของภาพ เช่น แสงอาทิตย์ ก้อนเมฆ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องในการสร้าง Mask ค่ามุมสูงได้ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยหลายงานที่พยายามนำเทคนิคอื่นมาประยุกต์ใช้ร่วมกับภาพฟิซายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิคให้มากขึ้น ดังเช่นในงานวิจัยของ Kato et al. (2016) ได้ใช้วิธี K-means เพื่อจัดกลุ่มชนิดดาวเทียมร่วมกับเทคนิค Matching point กับภาพฟิซาย ด้วยวิธีนี้สามารถตัดดาวเทียม NLOS ออกและทำให้ค่า RMSE ในทางราบลดลงร้อยละ 21.08 (0.047 เมตร)

เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่นิยมใช้เพื่อวิเคราะห์ความสอดคล้องกับผลชนิดดาวเทียมที่ปรากฏในภาพฟิซาย พบว่าค่ามุมสูงดาวเทียมและค่าความแรงของสัญญาณจากค่า SNR มักถูกใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ทั้งสองมีความสัมพันธ์กับลักษณะของสัญญาณจากดาวเทียม NLOS และสัญญาณสะท้อนจากคลื่นหลายวิถี กล่าวคือ ในทางทฤษฎีค่าความแรงของสัญญาณจะลดลงเมื่อสัญญาณถูกบดบังหรือมีการสะท้อน ซึ่งมักเกิดจากการรับสัญญาณจากดาวเทียมในค่ามุมสูงที่ต่ำ (Rizos C, 1997; Grove ,2013) ดังนั้น โดยอาศัยข้อมูลค่าพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ จึงมีงานวิจัยจำนวนมากได้ทำการพัฒนาเทคนิควิธีโดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ เพื่อให้สามารถจัดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในวิธีแบบพื้นฐานหรือการใช้ค่าเกณฑ์แบบค่าคงที่ เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการลดผลจากคลื่นหลายวิถี เช่น ในงานวิจัยของ Sánchez et al (2017) ได้กำหนดค่าเกณฑ์จากค่า SNR โดยหากค่ามากกว่า 40 เดซิเบลเฮิร์ต จะถูกจัดให้เป็นสัญญาณจาก

ดาวเทียม LOS แต่หากค่าน้อยกว่า 30 เดซิเบลเฮิร์ต จะถูกจัดให้เป็นสัญญาณจากดาวเทียม NLOS ผลการทดสอบพบว่า เมื่อตัดสัญญาณดาวเทียม NLOS ออกพบว่า ค่าเฉลี่ยค่าคลาดเคลื่อนทางราบลดลง 0.50 เมตร ในงานวิจัยของ Uratanawong et al. (2020) ได้ทดสอบหาค่าเกณฑ์แบบคงที่ของค่า SNR ที่เหมาะสมที่สุด ผลการทดสอบพบว่า เมื่อกำหนดตัดสัญญาณที่มีค่า SNR น้อยกว่า 36 เดซิเบลเฮิร์ต จะให้ผลลัพธ์ทางตำแหน่งที่ดีที่สุด โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในทางราบลดลงร้อยละ 46.80 (ประมาณ 3 เมตร) และทางดิ่งลดลงร้อยละ 12.88 (ประมาณ 2 เมตร)

เมื่อพิจารณาถึงข้อจำกัดในการกำหนดตัดค่า SNR หรือค่ามุมสูงดาวเทียมที่เป็นค่าคงที่ พบว่าด้วยวิธีนี้จะทำให้สัญญาณ LOS ที่มาจากค่ามุมสูงที่ต่ำและมีค่าความแรงของสัญญาณต่ำ ถูกตัดออกทั้งหมด ดังนั้นต่อมาในงานวิจัยส่วนใหญ่จึงนิยมกำหนดค่าเกณฑ์จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสูงดาวเทียมกับค่า SNR เนื่องจากให้ผลที่มีประสิทธิภาพมากกว่า อย่างไรก็ตามด้วยการใช้ค่าเกณฑ์ในลักษณะนี้จะต้องมีการกำหนดค่าเทรชโฮลด์ ที่เหมาะสมเพื่อใช้ลบออกจากค่าที่วัดได้ ซึ่งจากงานวิจัยของ Tokura et al. (2014) พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 8 เดซิเบลเฮิร์ตลบจากค่าเฉลี่ยของค่า SNR ในแต่ละช่วงค่ามุมสูง และผลทำให้ค่าคลาดเคลื่อนจากการหาตำแหน่งด้วยวิธี DGSS ลดลง ในทางราบได้สูงสุดถึงร้อยละ 57.53 (5 เมตร) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยต่อมาของ Tokura & Kubo (2017) ได้ทำการทดสอบกับข้อมูลที่รังวัดใหม่จากสภาพแวดล้อมและเครื่องรับสัญญาณที่ต่างกัน ผลพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 6 เดซิเบลเฮิร์ต ซึ่งสามารถลดคลาดเคลื่อนเบี่ยงเบนมาตรฐานในทางราบและทางดิ่งในระดับมิลลิเมตรและเซนติเมตรตามลำดับ ในงานวิจัยของ Yamamoto et al. (2015) ได้พบว่าเมื่อกำหนดค่าเทรชโฮลด์ เท่ากับ 10 เดซิเบลเฮิร์ต ผลค่าความถูกต้องทางตำแหน่งดีขึ้นจากวิธีพื้นฐานโดยตัดค่ามุมสูงดาวเทียมที่ 20 องศาและค่า SNR ที่ 30 เดซิเบลเฮิร์ต โดยสามารถลดค่า RMSE ได้ประมาณ ร้อยละ 33 ถึงร้อยละ 66 เช่นเดียวกันกับในงานวิจัยของ Uratanawong et al., 2020 ได้พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 10 เดซิเบลเฮิร์ต ซึ่งทำให้ค่า RMSE ในทิศทางดิ่งลดลงสูงสุดถึงร้อยละ 18.10 (3 เมตร) จากการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวด้วยข้อมูลซูโดเรนจ์

ถึงแม้ว่าเทคนิคที่อาศัยค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียมจะเป็นวิธีที่นิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากถือได้ว่ามีประสิทธิภาพในการลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีและสัญญาณ NLOS อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่มีการรับสัญญาณคลื่นหลายวิถีอย่างรุนแรงหรือมีการรับสัญญาณสะท้อนมากเกินไป 2 ครั้ง การตัดดาวเทียมจากเทคนิคที่อาศัยค่า SNR แบบเดิมอาจไม่สามารถลดผลได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งสามารถพิจารณาได้จากลักษณะความผันผวนของค่า SNR ที่ยังคงปรากฏในข้อมูล

สัญญาณดาวเทียมที่ได้รับ จากการศึกษาและวิเคราะห์ความผันผวนของค่า SNR ที่มีผลจากคลื่นหลายวิถี ในงานวิจัยของ Fang et al. (2015) ได้ทดลองสร้างแบบจำลองสัญญาณดาวเทียมในระบบต่างๆ และพบว่าขนาดคลื่นหลายวิถีจากดาวเทียมแต่ละประเภทส่งผลต่อลักษณะความผันผวนของค่า SNR แตกต่างกันได้ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จาก ระยะเวลาในการแกว่งของสัญญาณ (Fluctuated range) และขนาดความแกว่งของสัญญาณซึ่งคำนวณได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังนั้นเทคนิคที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงระยะเวลาหนึ่งคือการใช้เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตามในเทคนิคนี้ต้องกำหนดขนาดมูฟวิงวินโดว์และค่าเทรชโฮลด์ ที่เหมาะสม โดยผลจากงานวิจัยพบว่าเมื่อกำหนดขนาดมูฟวิงวินโดว์ ที่ 10 นาที และค่าเทรชโฮลด์ ที่ 4 เดซิเบลเฮิร์ต ผลการทดสอบพบว่าค่า RMSE ในทางราบลดลงถึงร้อยละ 86.50 (20.6 เซนติเมตร) ในขณะที่ในทางดิ่งลดลงร้อยละ 79.97 (5.9 เซนติเมตร) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของ Tokura and Kubo (2017) ได้ทดสอบพบว่าเมื่อกำหนดค่าเทรชโฮลด์ ต่ำกว่า 6 เดซิเบลเฮิร์ต เกิดการตัดสัญญาณออกมากเกินไปดังนั้น เมื่อกำหนดค่า ที่ 7 เดซิเบลเฮิร์ตและขนาดมูฟวิงวินโดว์ที่ 5 นาที ให้ผลที่ดีที่สุดโดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงร้อยละ 10 (0.26 เซนติเมตร)

ในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคนิคใหม่เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการจัดผลจากคลื่นหลายวิถีเช่นในงานวิจัยของ Lin et al. (2018) ได้ใช้เทคนิคการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือของค่า SNR ด้วยวิธี K-means ผลทำให้ค่าเศษเหลือถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มชนิดสัญญาณดาวเทียม โดยกลุ่มที่เป็นสัญญาณจากดาวเทียม NLOS จะถูกตัดออกและไม่ใช้ประมวลผลค่าตำแหน่งด้วยวิธี RTK ผลจากการทดสอบด้วยการวัดเฟสคลื่นส่ง พบว่านอกจากเทคนิคนี้จะสามารถตรวจจับดาวเทียม NLOS ได้มากกว่าวิธีแบบพื้นฐานเฉลี่ยร้อยละ 10.82 ยังสามารถปรับปรุงค่า Availability และ Reliability ของค่าเลขปริศนา (Ambiguity) อย่างไรก็ตามผลจากการตัดดาวเทียมไม่สามารถลดค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งได้ ในงานวิจัยของ Uaratanawong et al.(2021) ได้นำหลักการจากเทคนิค K-means มาใช้ทดสอบกับการหาค่าตำแหน่งด้วยข้อมูลเฟสคลื่นส่งที่ต้องการความถูกต้องทางตำแหน่งสูงในระดับมิลลิเมตรถึงเซนติเมตร โดยในแต่ละเทคนิควิธีนี้มีหลักเกณฑ์และค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมแตกต่างกัน

จากการศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดพบว่าเทคนิคตัดสัญญาณดาวเทียมนิยมนำมาใช้ในการหาค่าตำแหน่งด้วยข้อมูลเฟสคลื่นส่งที่ต้องการความถูกต้องทางตำแหน่งสูงในระดับมิลลิเมตรถึงเซนติเมตร โดยในแต่ละเทคนิควิธีนี้มีหลักเกณฑ์และค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมแตกต่างกัน

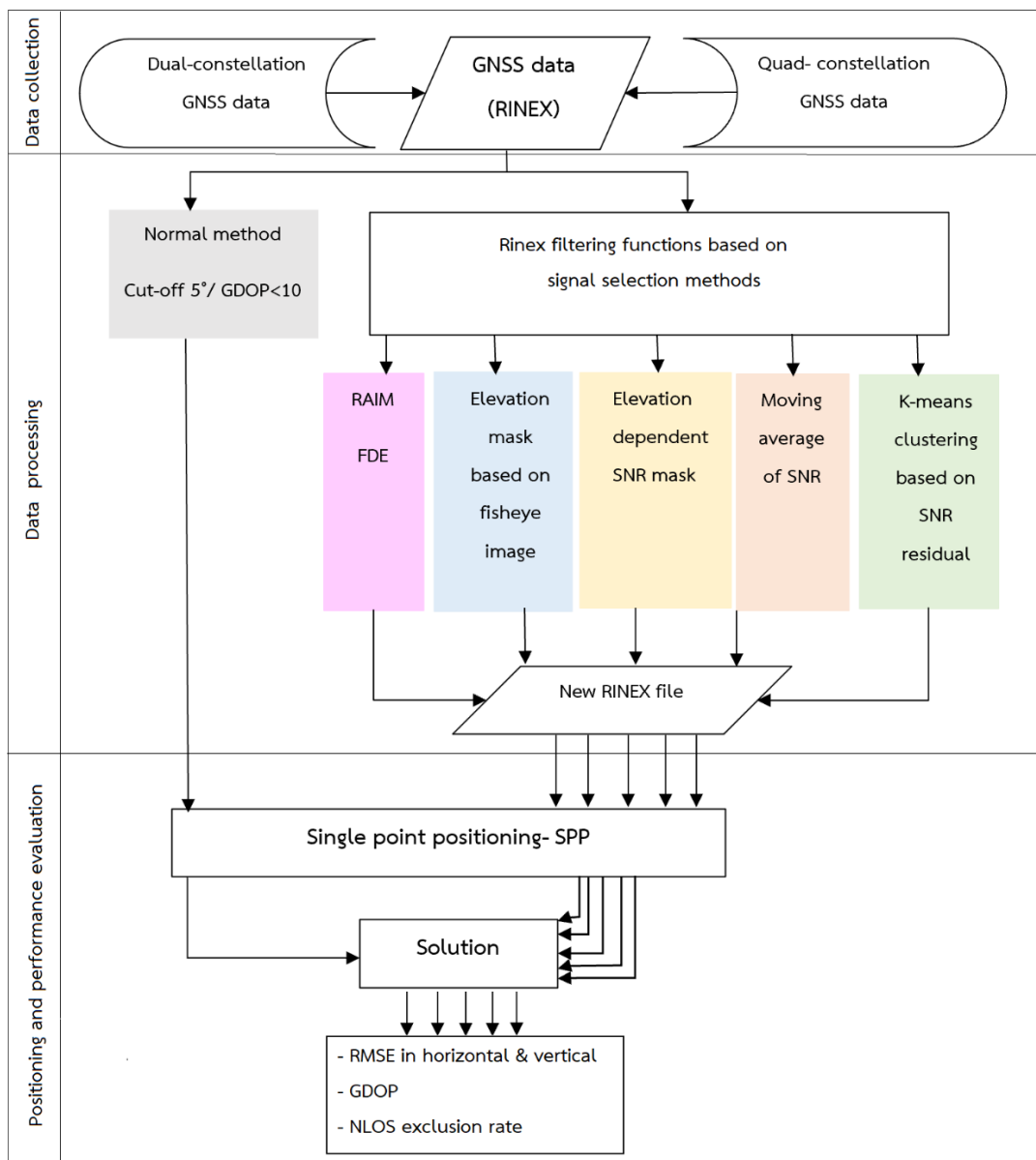
ออกไปส่งผลต่อระดับความสามารถในการปรับปรุงค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง นอกจากนี้ในงานวิจัยส่วนใหญ่นิยมอาศัยการวิเคราะห์ถึงปัจจัยหรือค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับลักษณะคลื่นหลายวิธีเพียงด้านใดด้านหนึ่ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบเทคนิคเลือกดาวเทียมโดยอาศัยข้อมูลค่าตัวแปรที่สัมพันธ์กับคลื่นหลายวิธีโดยตรงทั้งหมดและนำเทคนิคมาปรับใช้ในการลดค่าคลาดเคลื่อนจากการวัดระยะด้วยข้อมูลซูโดเรนจ์เพื่อทดสอบหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมที่สุดกับข้อมูลและประเมินผลหาเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดเพื่อประโยชน์ในการปรับปรุงค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้รับ



บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักได้แก่ การเก็บข้อมูลในสนาม, การประมวลผลสัญญาณด้วยการกรองข้อมูลค่าสังเกตและการประมวลผลค่าตำแหน่งและประเมินประสิทธิภาพของเทคนิค ดังแสดงในรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 แสดงแผนผังการประมวลผลข้อมูลในงานวิจัย

3.1 การเก็บข้อมูลในสนาม

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพของเทคนิคเลือกดาว ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลรังวัดดาวเทียมด้วยเครื่องรับสัญญาณ 2 เครื่องที่มีคุณสมบัติในการรับสัญญาณต่างกัน ได้แก่ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบ 2 ระบบ ยี่ห้อ Trimble รุ่น R7 รับสัญญาณจากดาวเทียม GPS และ GLONASS และเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบ 4 ระบบ ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 รับสัญญาณจากดาวเทียม GPS, GLONASS, BeiDou และ Galileo โดยกำหนดความถี่ในการรับสัญญาณเท่ากับ 1 เฮิร์ตและ ทุก 1 วินาที นอกจากนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลรังวัดดาวเทียมใน 2 จุดพื้นที่ทดสอบที่ได้รับผลจากคลื่นหลายวิถีต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3-2



(ก.) จุดทดสอบที่ 1 บริเวณหน้าอาคารชั้น 1
ตึกศลิธานีเทศ ภาควิศวกรรมสำรวจ



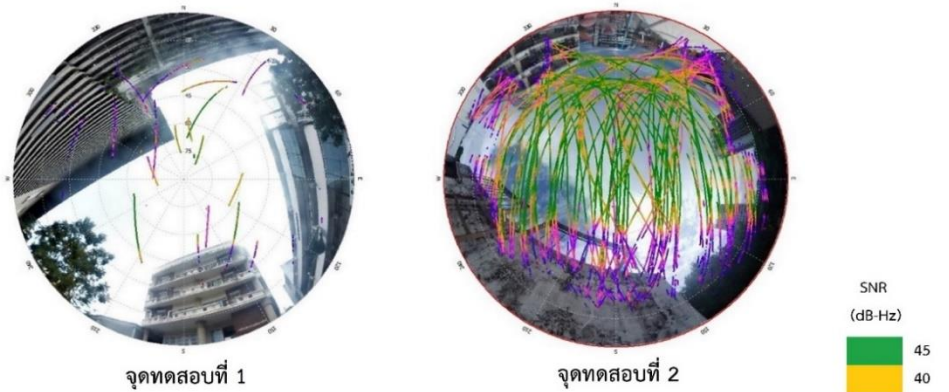
(ข.) จุดทดสอบที่ 2 บริเวณดาดฟ้าอาคารชั้น 4
ตึกศลิธานีเทศ ภาควิศวกรรมสำรวจ

รูปที่ 3-2 แสดงสภาพแวดล้อมบริเวณพื้นที่ทดสอบ

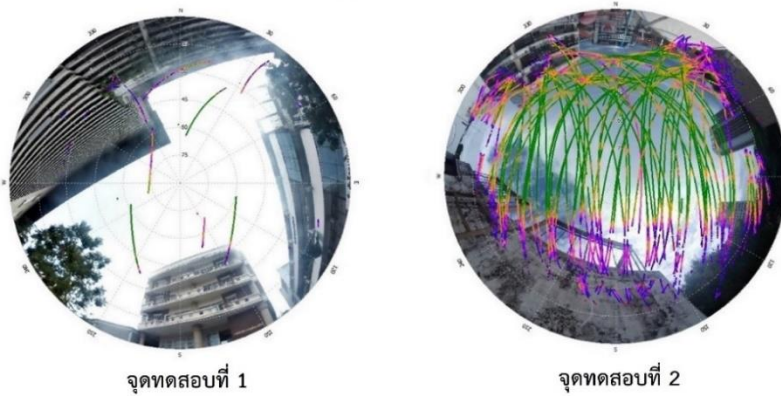
จากรูปที่ 3-2 ในจุดทดสอบที่ 1 ทำการรับสัญญาณบริเวณชั้น 1 หน้าอาคารศลิธานีเทศ ภาควิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้ระยะเวลาในการรับสัญญาณประมาณ 1 ชั่วโมง สำหรับในจุดทดสอบที่ 2 ทำการรับสัญญาณบริเวณชั้น 4 ที่ดาดฟ้าของอาคารเดียวกันโดยตั้งเครื่องรับสัญญาณใกล้กับกำแพงคอนกรีตและใช้ระยะเวลาในการรับสัญญาณ 24 ชั่วโมง

เพื่อเก็บภาพสภาพแวดล้อมจริงเหนือเครื่องรับสัญญาณ ทำการตั้งกล้องพิกซายี่ห้อ Samsung gear 360° บนเสาอากาศรับสัญญาณ โดยหันหัวกล้องชี้ไปยังทิศเหนือจริงและหมายเลขชั้นชี้ฟ้า ข้อมูลดาวเทียมในแต่ละชุดจะถูกนำมาแสดงผลร่วมกับภาพถ่ายพิกซายโดยแสดงในรูปที่ 3-3

เครื่องรับสัญญาณ GNSS แบบ 4 ระบบ



เครื่องรับสัญญาณ GNSS แบบ 2 ระบบ



รูปที่ 3-3 แสดง Skyplot ของข้อมูลทดสอบ

เพื่อเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของผลลัพธ์ทางด้านหนึ่ง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การโยงเส้นฐานจากค่าพิกัดอ้างอิงที่มีความถูกต้องสูงที่ได้จากสถานีอ้างอิงในกรอบอ้างอิงภาคพื้นดินนานาชาติหรือ ITRF (International terrestrial reference frame) ผ่านเว็บไซต์ผู้ให้บริการหาค่าตำแหน่งแบบออนไลน์ The Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning (CSPS-PPP) ซึ่งสามารถเข้าถึงได้จาก <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tool-outils/ppp.php>

ตารางที่ 3-1 แสดงค่าพิกัดอ้างอิงของข้อมูลทดสอบ

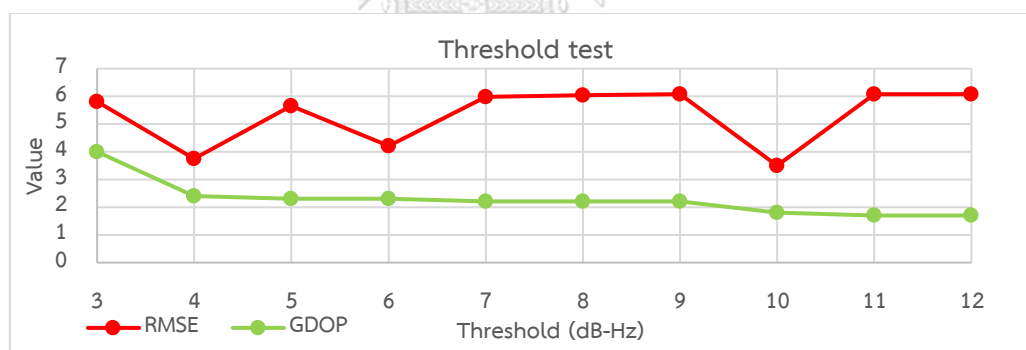
ชุดข้อมูล		ค่าพิกัดอ้างอิง		
จุดทดสอบ	เครื่องรับสัญญาณ	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)	ความสูง (เมตร)
1	2 ระบบ	13.7355896972	100.5323454833	-30.1107
2	2 ระบบ	13.735461590	100.532298890	-15.314
1	4 ระบบ	13.7355862194	100.5324816889	-30.1107
2	4 ระบบ	13.7354602667	100.5323011111	-16.889

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องใช้ข้อมูลค่า SNR ซึ่งบันทึกอยู่ในข้อมูลค่าสังเกตดาวเทียมที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณ 2 เครื่อง ซึ่งอาจให้ค่าที่วัดได้แตกต่างกัน ดังนั้นค่า SNR จากข้อมูลทั้ง 4 ชุดจึงถูกนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยในทุกค่ามุมสูงดาวเทียมที่ 5 องศาและเปรียบเทียบกันเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ผลการเปรียบเทียบค่า SNR จากเครื่องรับสัญญาณแบบ 2 ระบบดาวเทียม และ 4 ระบบดาวเทียมแสดงใน ภาคผนวก ข. ผลแสดงให้เห็นว่าค่า SNR ที่วัดได้ในจุดทดสอบเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกันโดยค่าต่างกันไม่เกิน ± 2 เดซิเบลเฮิร์ต

3.2 การประมวลผลข้อมูล

3.2.1 การทดสอบค่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ในเทคนิคเลือกดาวเทียมโดยอาศัยค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียมและวิธีใช้ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จะต้องมีการกำหนดค่าน้อยที่สุดที่ยอมรับได้ หรือ ค่าเทรชโฮลด์ เพื่อใช้เป็นค่าเกณฑ์ตัดสัญญาณดาวเทียม ในการทดสอบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การกำหนดช่วงค่าที่ใช้ทดสอบจากการวิเคราะห์การกระจายของข้อมูล และ 2) การประมวลผลทางตำแหน่งเพื่อหาผลการปรับปรุงค่าคลาดเคลื่อน RMS และ ค่า GDOP ที่ดีที่สุด



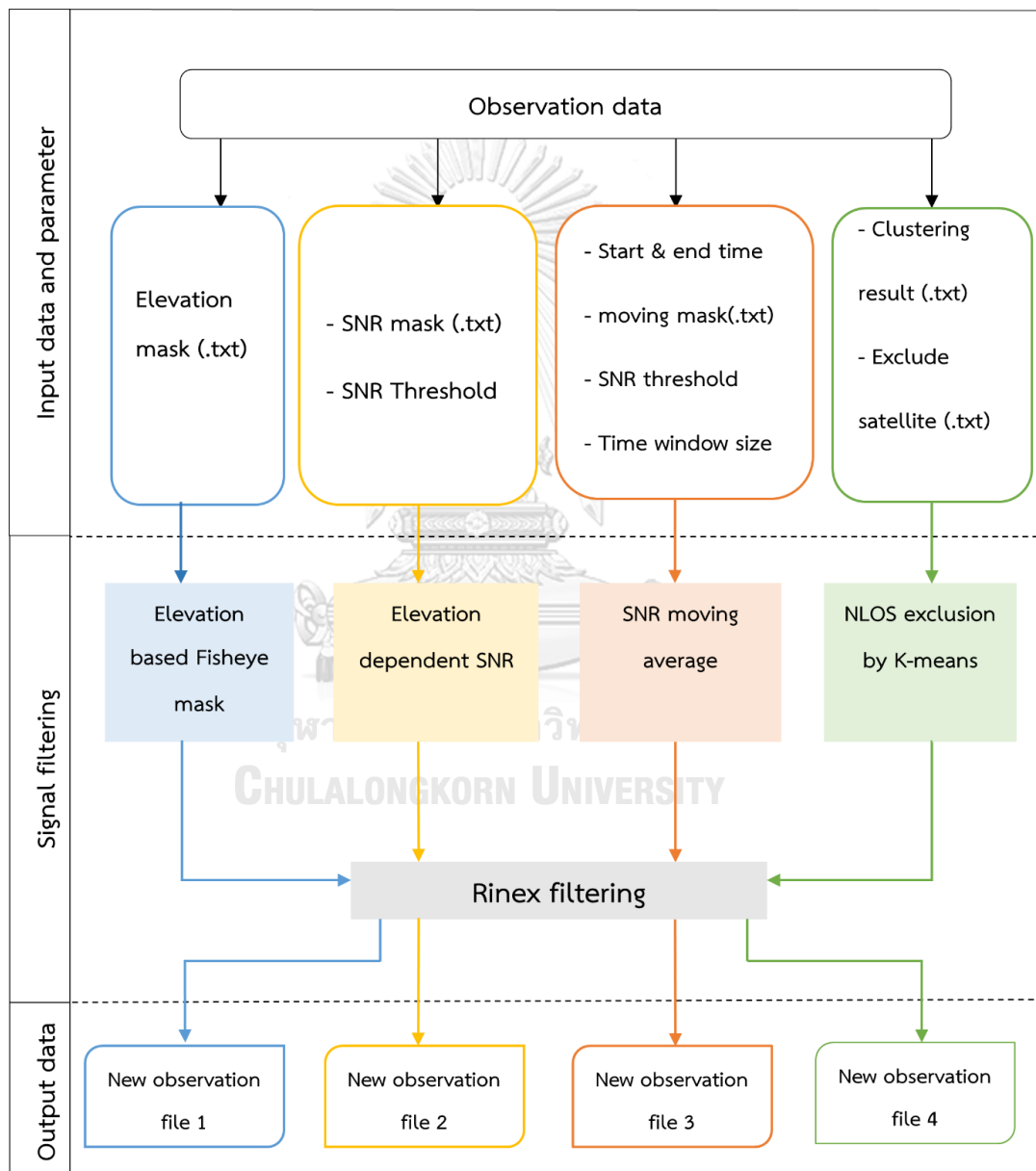
รูปที่ 3-4 แสดงการทดสอบหาค่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้

3.2.2 การกรองสัญญาณดาวเทียม

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาและสร้างชุดคำสั่งภาษา Python โดยใช้ซอฟต์แวร์ Spider (Anaconda 3) เพื่อใช้ในการกรองสัญญาณดาวเทียมจากข้อมูลค่าสังเกต ที่จัดเก็บในรูปแบบไฟล์ Rinex โดยเรียกชุดคำสั่งนี้ว่า Rinex filtering ประกอบด้วยหลักการตัดสัญญาณดาวเทียม 4 วิธี ได้แก่ 1) วิธีที่อาศัย Mask ค่ามุมดาวเทียมที่สร้างจากภาพแบบฟิชอาย (Elevation mask based on fisheye image), 2) วิธีที่อาศัยค่าเฉลี่ยของค่า SNR ในแต่ละค่ามุมสูงดาวเทียม (Elevation dependent average SNR mask), 3) วิธีที่อาศัยการใช้ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR (SNR moving

average mask) และ 5) วิธีที่อาศัยการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือของค่า SNR ด้วย K-means (SNR residual based on k-means clustering)

แผนผังขั้นตอนการทำงานของชุดคำสั่ง Rinex filtering (รูปที่ 3-5) ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การนำเข้าข้อมูล (Input data), การกรองสัญญาณ (Signal filtering) และการส่งออกข้อมูล (Output data)



รูปที่ 3-5 แสดงขั้นตอนการกรองข้อมูลค่าสังเกตด้วยชุดคำสั่ง Rinex filtering

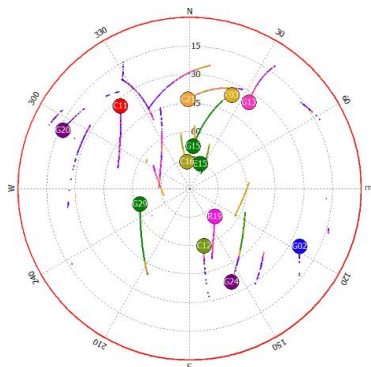
จากรูปที่ 3-5 ในขั้นตอนการนำเข้าข้อมูล ข้อมูลที่จำเป็นต้องนำเข้าก่อนการประมวลผล ด้วยเทคนิคเลือกดาวเทียมในทุกวิถี ได้แก่ ข้อมูลค่าสังเกตดาวเทียมและข้อมูลค่า SNR (ถูกบันทึกอยู่ในข้อมูลค่าสังเกต) อย่างไรก็ตามในแต่ละเทคนิคจะต้องนำเข้าข้อมูลและค่าพารามิเตอร์เฉพาะดัง แสดงรายละเอียดในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-2 แสดงรายละเอียดการนำเข้าค่าพารามิเตอร์ในชุดคำสั่ง Rinex filtering

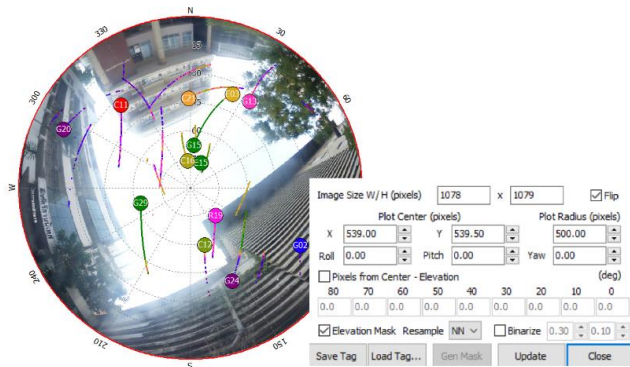
เทคนิควิธี	การนำเข้าค่าพารามิเตอร์	คำอธิบายข้อมูลและค่าพารามิเตอร์
1. ตัดดาวเทียมตามค่ามุมสูงดาวเทียมโดยอาศัยภาพพิกซาย	Elevation mask (.txt)	ขอบเขตที่แสดงค่ามุมสูงในทุกค่ามุมเอซิมัท
2. ตัดดาวเทียมตามค่า SNR ในแต่ละค่ามุมสูงดาวเทียม	SNR mask (.txt)	ค่าเฉลี่ยของค่า SNR ในทุกค่ามุมสูง 5° โดยคำนวณแยกตามระบบดาวเทียม
	Threshold	ค่าน้อยที่สุดที่ยอมรับได้ (ค่าที่ใช้ลบออกจากเส้นค่าเฉลี่ย)
3. ตัดดาวเทียมโดยอาศัยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR	Start and end time	เวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของข้อมูล
	Moving mask (.txt)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า SNR ในแต่ละช่วงเวลา
	Threshold	ค่าน้อยที่สุดที่ยอมรับได้ (ค่าที่ใช้เปรียบเทียบกับค่า SD.)
	Time window size	ขนาดของมูฟวิงวินโดว์
4. ตัดดาวเทียมโดยอาศัยการจัดกลุ่มด้วย K-means	Clustering result (.txt)	ผลการจัดกลุ่มชนิดดาวเทียม
	Exclude satellite (.txt)	ผลการระบุดาวเทียมที่ถูกตัดออก

จากตารางที่ 3.3 ในวิธีตัดดาวเทียมโดยอาศัยค่า SNR ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสามารถคำนวณโดยใช้คำสั่งซึ่งรวมอยู่ในขั้นตอนการกรองสัญญาณดาวเทียม อย่างไรก็ตาม สำหรับวิธีที่อาศัยภาพพิกซายและเทคนิคการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือของค่า SNR ด้วย K-means นั้นจะต้องอาศัยข้อมูลเพิ่มเติมซึ่งต้องประมวลผลนอกซอฟต์แวร์ Spider

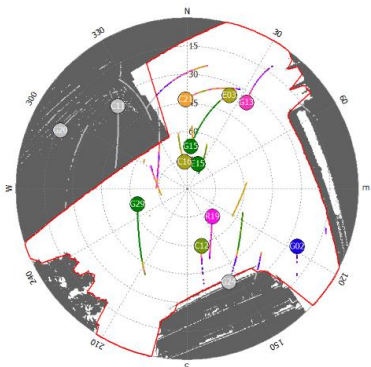
ในวิธีการตัดสัญญาณดาวเทียมโดยอาศัยภาพพิกซาย ไฟล์ Elevation mask.txt สามารถสร้างจากซอฟต์แวร์ RTKLIB ด้วยฟังก์ชัน RTKPLOT และ คำสั่ง Generate mask โดยขั้นตอนการสร้าง Mask ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) นำเข้าข้อมูลดาวเทียมและภาพถ่ายพิกซาย 2) ปรับแก้ตำแหน่งภาพถ่าย 3) สร้างภาพไบนารีเพื่อแยกพื้นที่ส่วนที่เป็นท้องฟ้าและวัตถุออกจากกัน และ 4) สร้างไฟล์ mask และบันทึกในรูปแบบไฟล์ Text (รูปที่ 3-6)



Step 1 : Input observation and navigation data



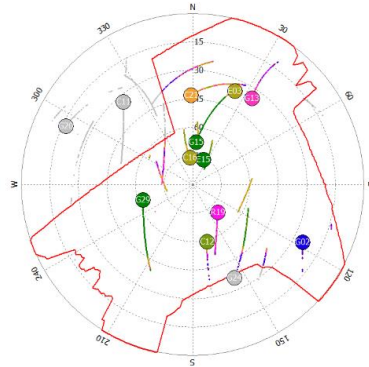
Step 2 : Open sky image and adjust image



Step 3 : Binarize an image and generate mask

% Elevation Mask	% AZ(deg) El(deg)
0.0	6.3
1.0	5.6
2.0	4.7
3.0	3.7
4.0	3.1
5.0	2.0
6.0	1.0
7.0	0.1
8.0	0.0
28.0	7.8
29.0	8.7
30.0	9.5
31.0	10.5
32.0	10.9
33.0	11.7
34.0	12.3
35.0	12.8
36.0	13.5
37.0	13.9
38.0	14.5
39.0	15.0
40.0	15.4
41.0	16.1
43.0	16.7
44.0	17.1
45.0	17.5

Step 4 : Mask validation

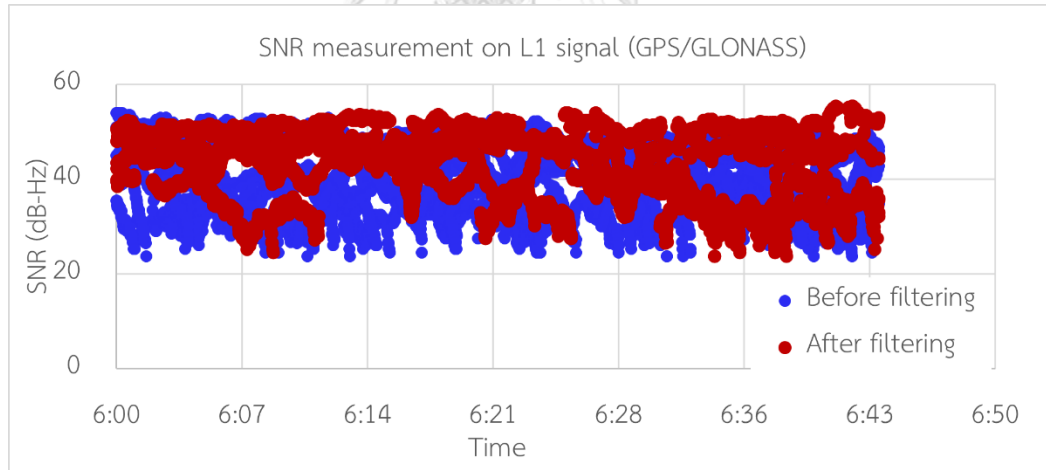


รูปที่ 3-6 แสดงขั้นตอนการสร้าง Mask ค่ามุมสูงในซอฟต์แวร์ RTKLIB

สำหรับวิธีการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือด้วย K-means ข้อมูลค่า SNR จะถูกนำมาจัดเรียงตามลำดับเวลาและนำเข้าสู่ซอฟต์แวร์ Matlab เพื่อประมาณหาค่าเศษเหลือของค่า SNR จากการปรับแก้ด้วยลิสต์สแควร์ จากนั้นด้วยคำสั่ง K-means ค่าเศษเหลือที่คำนวณได้จะถูกจัดเป็น 2 กลุ่มและบันทึกในไฟล์ชื่อ Clustering result.txt (รูปที่ 3-7) ข้อมูลที่มีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบจากค่าเฉลี่ยจากข้อมูลภายในกลุ่มจะถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสัญญาณดาวเทียม NLOS และจะถูกบันทึกแยกออกในไฟล์ชื่อ Exclude satellite.txt เพื่อใช้ตัดสัญญาณดาวเทียมในขั้นตอนการกรองข้อมูล

<pre> clustering_result_trim1.txt - Notepad File Edit Format View Help > 2019/10/16 05:35:20 8 G05 0.002408 1 G13 0.000926 2 G15 0.000545 2 G20 0.001431 1 G24 0.000254 2 G29 0.000551 2 R05 0.000572 2 R19 0.000400 2 > 2019/10/16 05:35:21 8 G05 0.002374 2 G13 0.000939 1 G15 0.000543 1 G20 0.001435 2 G24 0.000197 1 G29 0.000551 1 R05 0.000562 1 R19 0.000408 1 > 2019/10/16 05:35:22 8 G05 0.002363 2 G13 0.000936 1 G15 0.000543 1 G20 0.001469 2 G24 0.000049 1 G29 0.000550 1 R05 0.000560 1 R19 0.000400 1 </pre>	<pre> Exclude_sat_trim1.txt - Notepad File Edit Format View Help 2019/10/16 05:35:18 G05 2019/10/16 05:35:19 G05 2019/10/16 05:35:20 G05G20 2019/10/16 05:35:21 G05G20 2019/10/16 05:35:22 G05G20 2019/10/16 05:35:23 G05G20 2019/10/16 05:35:24 G05G20 2019/10/16 05:35:25 G05 2019/10/16 05:35:26 G05 2019/10/16 05:35:27 G05 2019/10/16 05:35:28 G05 2019/10/16 05:35:29 G05 2019/10/16 05:35:30 G05 2019/10/16 05:35:31 G05 2019/10/16 05:35:32 G05 2019/10/16 05:35:33 G05G20 2019/10/16 05:35:34 G05G20 2019/10/16 05:35:35 G05 2019/10/16 05:35:36 G05G20 2019/10/16 05:35:37 G05 2019/10/16 05:35:38 G05G24 2019/10/16 05:35:39 G05 2019/10/16 05:35:40 G05 2019/10/16 05:35:41 G05 2019/10/16 05:35:42 G05 2019/10/16 05:35:43 G05 2019/10/16 05:35:44 G20 </pre>
Clustering result.txt	Exclude satellite.txt

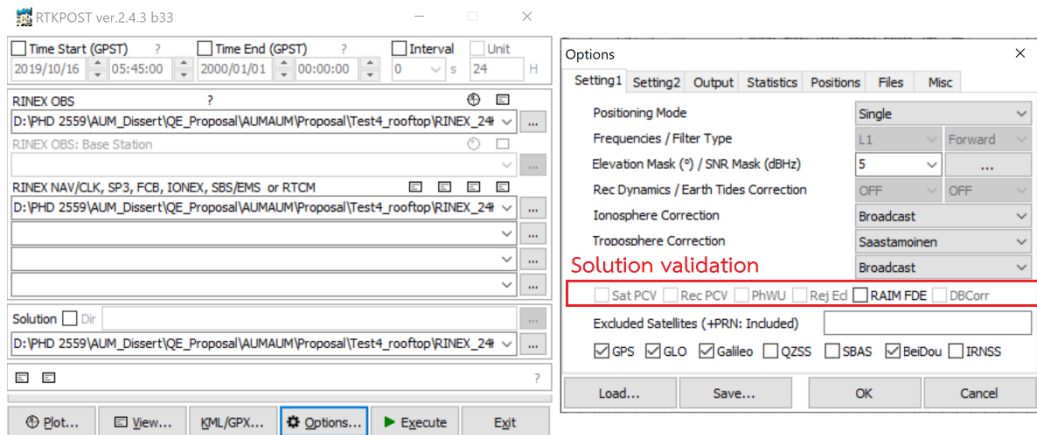
รูปที่ 3-7 แสดงผลลัพธ์การจัดกลุ่มค่าเศษเหลือของค่า SNR ด้วยวิธี K-means การกรองสัญญาณในแต่ละเทคนิคจะประมวลผลแยกกันโดยผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้จะเป็นข้อมูลค่าสังเกตใหม่ที่ถูกรองสัญญาณจากดาวเทียมที่มีผลจากคลื่นหลายวิถีออกโดยอาศัยหลักการของเทคนิคเลือกดาวเทียมแต่ละวิธี



รูปที่ 3-8 แสดงตัวอย่างข้อมูล SNR ที่ผ่านการกรองสัญญาณดาวเทียมด้วยเทคนิคฟิชชาย

3.2.3 การประมวลผลทางตำแหน่ง

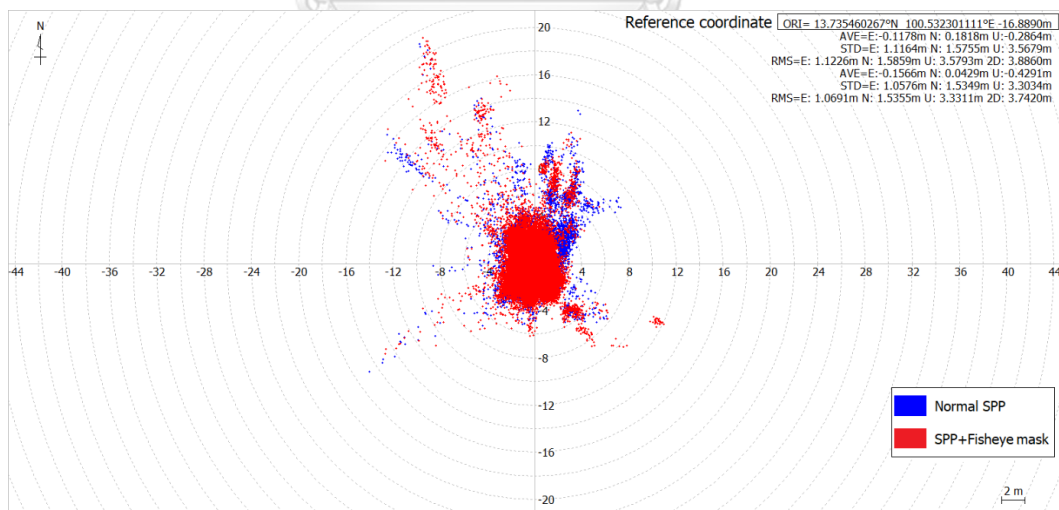
ในการประมวลผลค่าพิกัดตำแหน่งและค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง RMS ทำโดยใช้ฟังก์ชัน RTKPOST ในซอฟต์แวร์ RTKLIB โดยเลือกวิธีหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวด้วยข้อมูลความถี่เดี่ยวและกำหนดเกณฑ์พื้นฐานคือตัดค่ามุมสูงดาวเทียมที่ 5 องศาและค่า GDOP ไม่เกิน 10 องศา (รูปที่ 3-9)



รูปที่ 3-9 แสดงการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวด้วยฟังก์ชัน RTKPOST

จากรูปที่ 3-9 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์จากวิธีหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว ในซอฟต์แวร์ RTKLIB ได้ใช้อัลกอริทึม RAIM ในการทดสอบทางสถิติด้วยไครส์แคร์ โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของค่าความเป็นไปได้ที่จะไม่ผ่านการทดสอบเท่ากับ 0.001 และค่า DOF เท่ากับ 1 โดยจะต้องมีจำนวนดาวเทียมไม่ต่ำกว่า 6 ดวงในแต่ละรอบการประมวลผล

ในการแสดงผลค่าพิกัดตำแหน่งและค่าคลาดเคลื่อน RMS ที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับผลจากการหาตำแหน่งด้วยวิธีแบบธรรมดา จะแสดงผลโดยใช้ฟังก์ชัน RTKPLOT ในรูปแบบจุดค่าพิกัดในระบบ ENU (Ground track point) ดังแสดงในรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-10 แสดงผลค่าพิกัดในระบบ ENU

3.3 การประเมินประสิทธิภาพของเทคนิค

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่ใช้และหาเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดในการลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิธี ในงานวิจัยได้เลือกใช้เกณฑ์การประเมิน 3 ด้าน (Groves et al, 2013) โดยพิจารณาจากความสอดคล้องของผลลัพธ์ที่ได้ ดังมีรายละเอียดดังนี้

1. ความสามารถในการลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิธี

พิจารณาจากร้อยละการปรับปรุงค่า RMSE ในทิศทางราบและทิศทางตั้งโดยเปรียบเทียบผลกับวิธีแบบพื้นฐาน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$RMSE\ improvement(\%) = \left(\frac{RMSE_{normal} - RMSE_{proposed}}{RMSE_{normal}} \right) * 100 \quad (3-1)$$

2. การเปลี่ยนแปลงของค่าเรขาคณิตดาวเทียม

เรขาคณิตดาวเทียมหรือการวางตัวของดาวเทียมบนท้องฟ้าซึ่งบ่งชี้ได้จากค่าความไม่แน่นอนของตำแหน่งดาวเทียมหรือ DOP (Dilution of precision) เมื่อจำนวนดาวเทียมที่ได้รับลดลง ค่า DOP จะสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งลดลง หากค่า DOP มีค่าไม่เกิน 6 สามารถจัดอยู่ในระดับที่ดีและยอมรับได้ แต่หากค่า DOP มากกว่า 20 แสดงถึงความไม่น่าเชื่อถือของค่าตำแหน่งที่ได้รับ สำหรับการหาค่าตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวซึ่งประมาณค่าพารามิเตอร์ 4 ตัว ได้แก่ ค่าตำแหน่งพิกัด 3 มิติ (x, y, z) และเวลา (t) นิยมใช้การค่า GDOP (Geometric Dilution of Precision) หรือค่าความไม่แน่นอนในองค์ประกอบด้านตำแหน่งทางเรขาคณิต เนื่องจากสามารถบ่งชี้ถึงความถูกต้องโดยรวมของข้อมูลค่าสังเกตดาวเทียมที่รับได้ทั้งหมด (Langley, 1999)

ในงานวิจัยได้ใช้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่า GDOP เมื่อเปรียบเทียบผลกับวิธีแบบพื้นฐานเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาผล โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$GDOP\ improvement(\%) = \left(\frac{GDOP_{normal} - GDOP_{proposed}}{GDOP_{normal}} \right) * 100 \quad (3-2)$$

3. ความสามารถในการตัดสัญญาณจากดาวเทียม NLOS

พิจารณาจากร้อยละอัตราจำนวนสัญญาณดาวเทียม NLOS ที่ตัดออกด้วยเทคนิคที่ใช้ต่อจำนวนสัญญาณที่ตัดออกโดยเทคนิคที่อาศัยภาพพิซาย สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$NLOS\ exclusion\ rate = \frac{NLOS\ excluded_{proposed}}{NLOS\ excluded_{fisheye}} * 100 \quad (3-3)$$

บทที่ 4

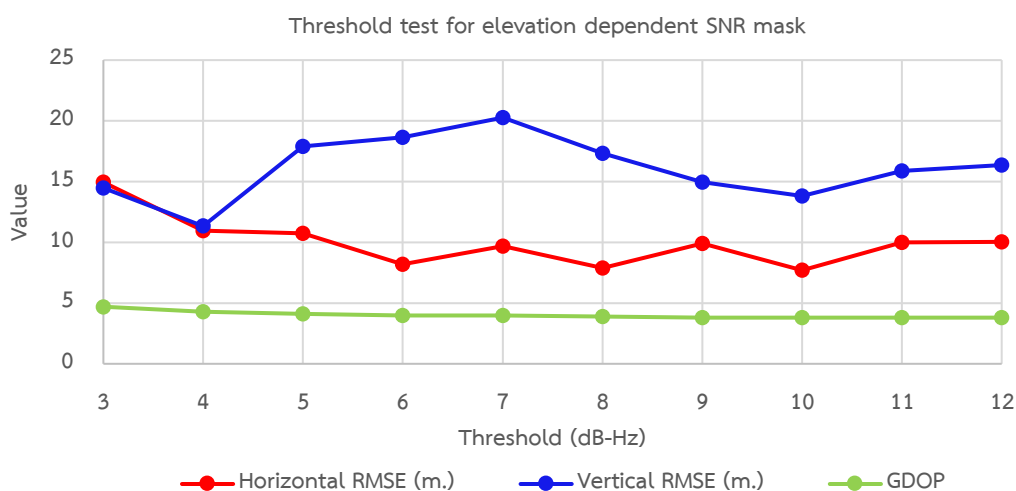
ผลการทดสอบด้วยข้อมูล GNSS แบบ 2 ระบบดาวเทียม

จากการทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคเลือกดาวเทียม 5 วิธี ในการลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม GPS และ GLONASS แบบความถี่เดี่ยวที่ได้จาก 2 พื้นที่ทดสอบ ผลการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

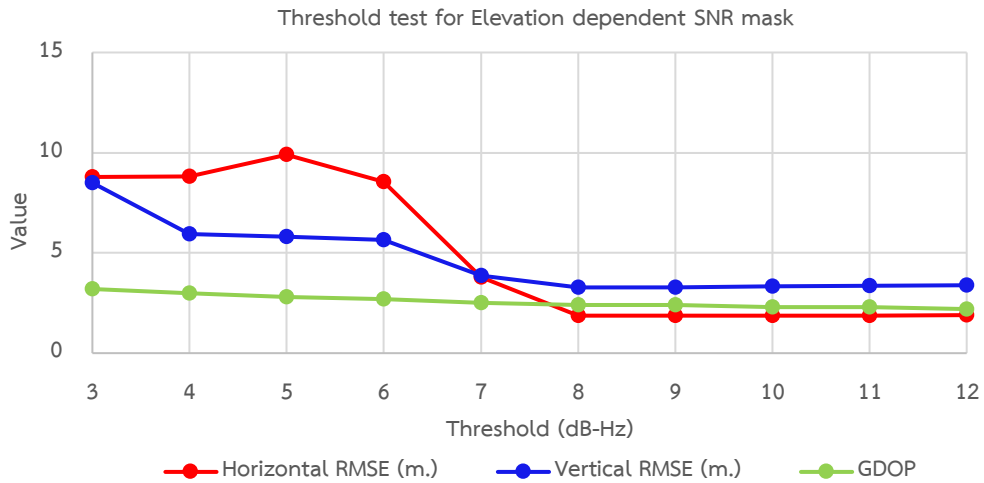
4.1 ผลการทดสอบค่าเทรชโวลต์ที่เหมาะสมที่สุด

1) เทคนิคตัดดาวเทียมโดยอาศัยค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม

การทดสอบได้กำหนดช่วงค่าเทรชโวลต์ ที่เหมาะสมเท่ากับ 3 ถึง 12 เดซิเบลเฮิร์ต เนื่องจากเมื่อกำหนดใช้ค่าต่ำกว่า 3 เดซิเบลเฮิร์ต จำนวนสัญญาณดาวเทียมถูกตัดออกเกินกว่าร้อยละ 50 ส่งผลให้ในบางชุดข้อมูลไม่สามารถประมวลผลหาค่าตำแหน่งได้ ในทางตรงข้ามเมื่อกำหนดใช้ค่ามากกว่า 12 เดซิเบลเฮิร์ต ผลพบว่าไม่มีการตัดสัญญาณออก ผลการทดสอบด้วยการประมวลผลทางตำแหน่งแสดงในรูปที่ 4-1 และรูปที่ 4-2 เมื่อนำค่าเทรชโวลต์ในช่วงค่าที่กำหนดลบออกจากค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่คำนวณได้ ผลการทดสอบพบว่าค่าเหมาะสมที่สุดที่ให้ผลค่า RMSE ในทิศทางราบและทางตั้ง และค่า GDOP ที่ดีที่สุดในทุกชุดข้อมูลเท่ากับ 10 เดซิเบลเฮิร์ต



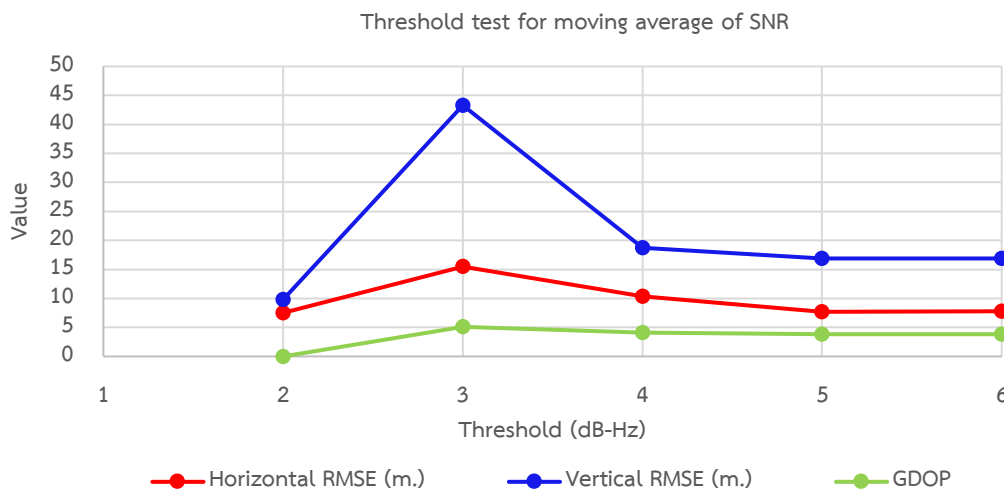
รูปที่ 4-1 แสดงผลทดสอบค่าเทรชโวลต์ที่เหมาะสมในเทคนิคที่อาศัยค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียมด้วยข้อมูลในจุดทดสอบที่ 1



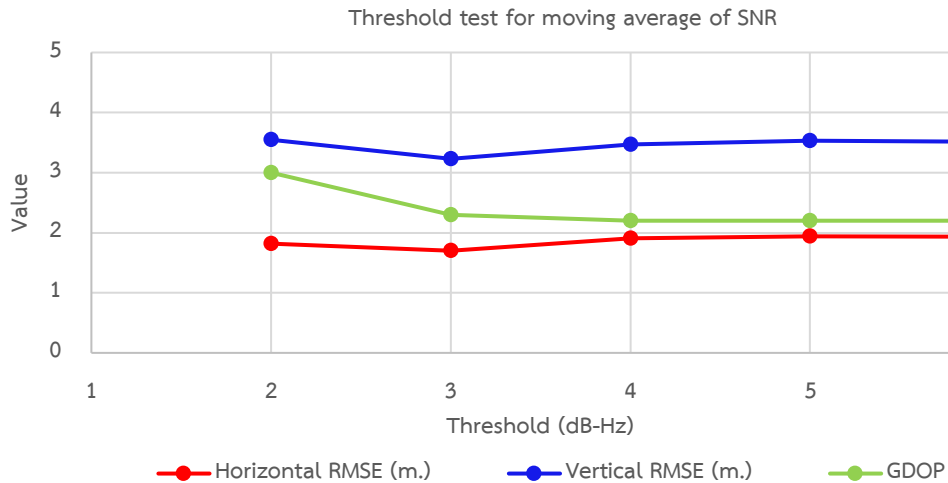
รูปที่ 4-2 แสดงผลทดสอบค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมในเทคนิคที่อาศัยค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูง ดาวเทียมด้วยข้อมูลในจุดทดสอบที่ 2

2) เทคนิคตัดดาวเทียมโดยอาศัยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เมื่อพิจารณาการกระจายของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า SNR ในช่วงเวลา 5 วินาทีพบว่า มีค่าสูงสุดไม่เกิน 6 และต่ำสุดคือ 0 ดังนั้นในการทดสอบได้กำหนดช่วงค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสม เท่ากับ 1 ถึง 6 เดซิเบลเฮิร์ต ผลการทดสอบหาค่า RMSE ในทางราบและทางตั้งรวมถึงค่า GDOP แสดงในรูปที่ 4-3 และรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-3 แสดงผลทดสอบค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมในเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR ด้วยข้อมูล ในจุดทดสอบที่ 1



รูปที่ 4-4 แสดงผลทดสอบค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมในเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR ด้วยข้อมูล
ในจุดทดสอบที่ 2

จากกราฟข้างต้น เมื่อนำค่าเทรชโฮลด์ในช่วงค่าที่กำหนดเปรียบเทียบกับค่าเบี่ยงเบน
มาตรฐานของค่า SNR ที่คำนวณได้ และทำการตัดสัญญาณที่มีค่า SNR เกินกว่าค่าเทรชโฮลด์ ออกผล
การทดสอบพบว่า เมื่อกำหนดค่าเทรชโฮลด์ ที่ 3 เดซิเบลเฮิร์ตให้ผลค่า RMSE และค่า GDOP ที่ดี
ที่สุด เนื่องจากหากค่าต่ำกว่า 3 มีการตัดสัญญาณออกจำนวนมาก ในทางตรงข้ามหากค่ามากกว่า 4
แทบจะไม่มีการตัดสัญญาณออก อย่างไรก็ตามเมื่อทดสอบด้วยข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม
2 ระบบในจุดทดสอบที่ 1 (รูปที่ 4-3) ค่า RMSE ในทิศทางดิ่งเพิ่มขึ้นมากกว่า 40 เมตร ดังนั้นใน
ข้อมูลชุดนี้จึงกำหนดใช้ค่าเทรชโฮลด์ ที่ 5 เดซิเบลเฮิร์ต

4.2 ผลการทดสอบด้วยการประมวลผลแบบจุดเดียว

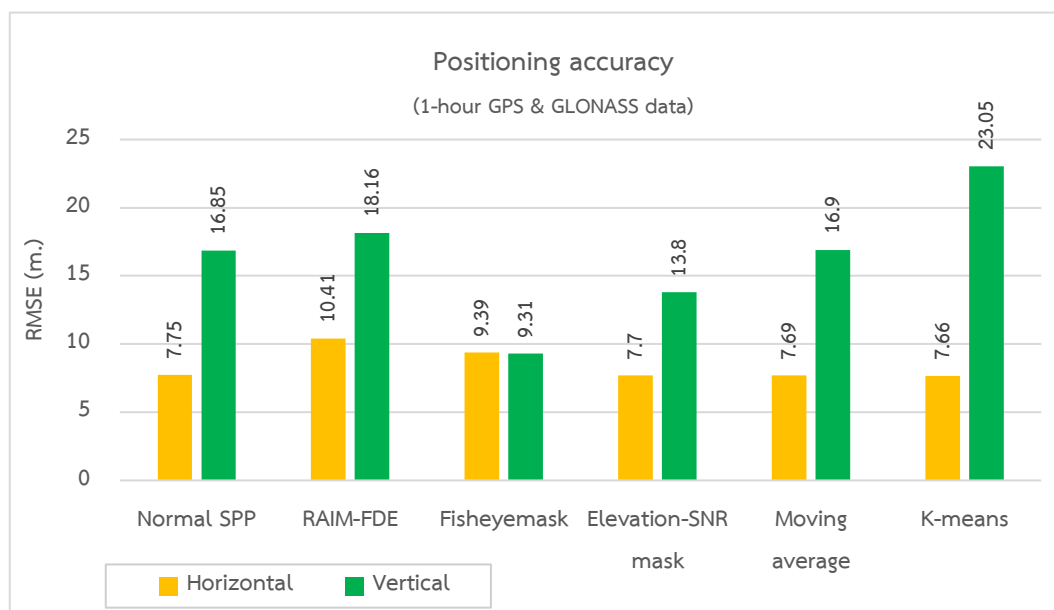
ผลการทดสอบแบ่งตามเกณฑ์ในการประเมินผล 3 หัวข้อ ได้แก่ ผลลัพธ์ค่าความถูกต้องเชิง
ตำแหน่ง, ผลลัพธ์ความถูกต้องเชิงเรขาคณิตดาวเทียมและผลลัพธ์ความถูกต้องในการตัดสัญญาณคลื่น
หลายวิธี ดังมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 ผลลัพธ์ความถูกต้องเชิงตำแหน่ง

โดยพิจารณาผลค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองหรือค่า RMSE ในทิศทาง
ราบและทิศทางดิ่ง ผลลัพธ์ที่ได้แบ่งตามข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผล แสดงดังนี้

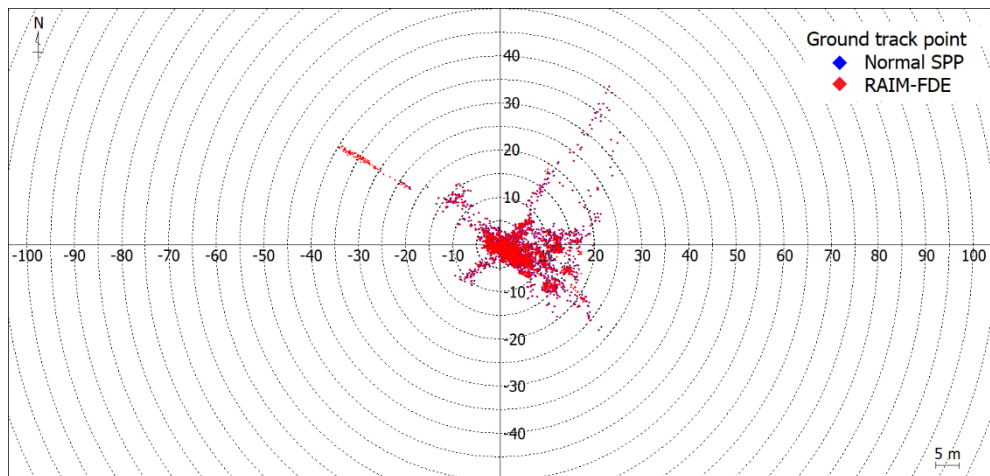
- 1) ผลการทดสอบด้วยข้อมูลจากจุดทดสอบที่ 1 (บริเวณหน้าอาคาร)

ผลค่าความถูกต้องทางตำแหน่งจากค่า RMSE ในทิศทางราบและทางตั้ง ผลลัพธ์แสดงจากกราฟในรูปที่ 4-5 และมีรายละเอียดดังนี้

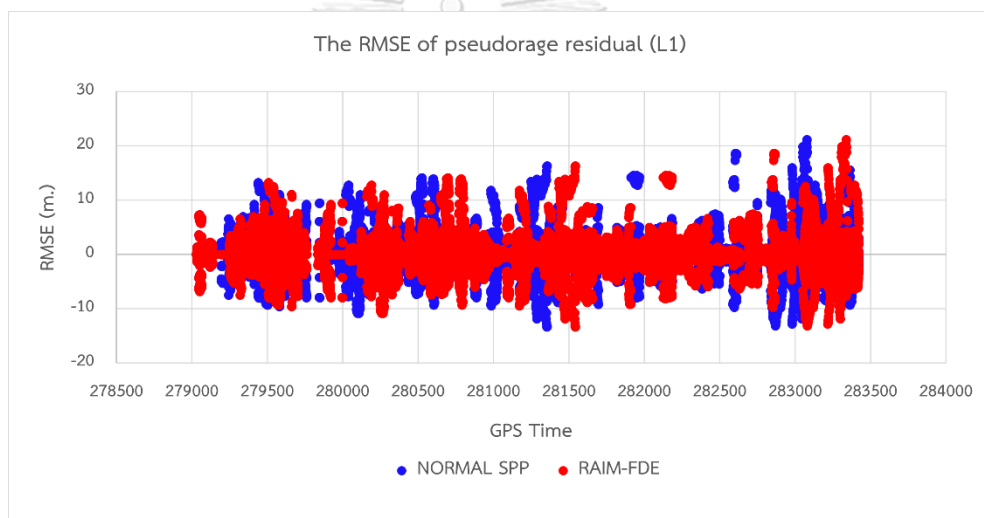


รูปที่ 4-5 แสดงค่า RMSE จากการทดสอบด้วยข้อมูลดาวเทียม 2 ระบบในจุดทดสอบที่ 1

จากกราฟในรูปที่ 4-5 เมื่อทำการตัดสัญญาณโดยใช้เทคนิค RAIM พบว่าค่า RMSE เพิ่มขึ้นในระดับเมตรจากวิธีหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวแบบพื้นฐาน โดยในทิศทางราบเพิ่มขึ้นร้อยละ 34.19 (2.66 เมตร) ในขณะที่ในทิศทางตั้งเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.77 (1.31 เมตร) เมื่อพิจารณาค่าพิกัดตำแหน่งที่ประมวลผลได้จากเทคนิค RAIM พบว่าทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ที่มากกว่า 20 เมตรเกิดขึ้นในทิศทางราบ (รูปที่ 4-6) ซึ่งสาเหตุเกิดจาก 1) มีระยะเวลาที่ไม่สามารถคำนวณค่าพิกัดได้ร้อยละ 1.07 (47/ 4393 epochs) จากการตัดดาวเทียมจนเหลือจำนวนดาวเทียมต่ำกว่า 6 ดวงและ 2) การตัดดาวเทียมออก 1 ดวงไม่สามารถตรวจจับดาวเทียมที่มีผลจากคลื่นหลายวิธีออกได้หมดทำให้ค่าเศษเหลือซูโดเรนจ์ที่เป็นค่าโตยังคงอยู่และ 3) RAIM ไม่สามารถเลือกตัดดาวเทียมได้ถูกต้องในบาง Epoch ทำให้ค่าเศษเหลือเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4-17)

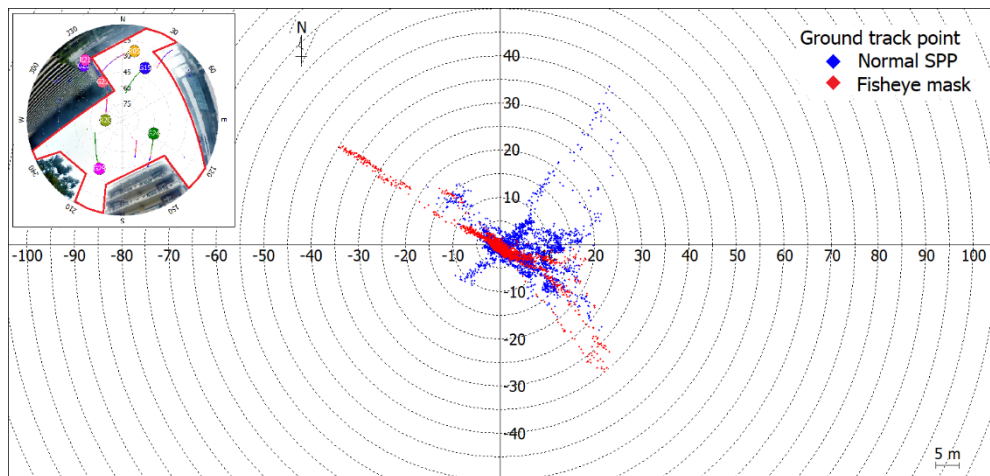


รูปที่ 4-6 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิค RAIM-FDE

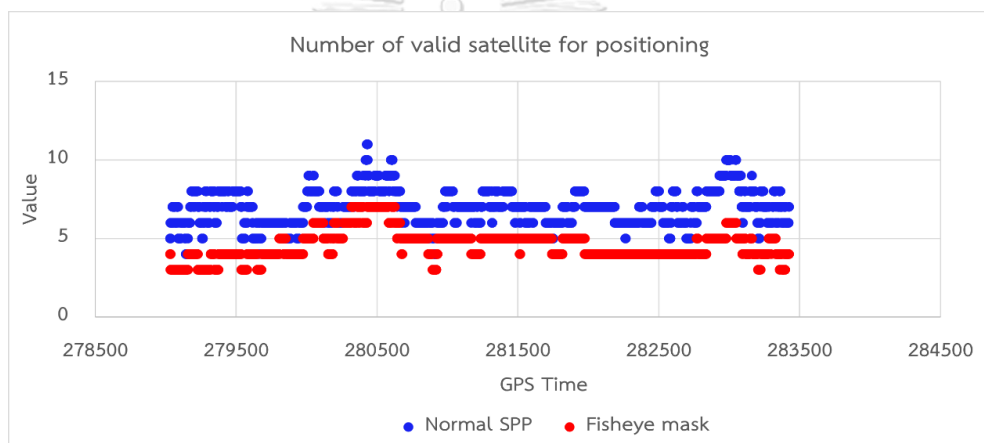


รูปที่ 4-7 แสดงการเปรียบเทียบค่าเศษเหลือซูโดเรนจ์จากวิธีแบบพื้นฐานและเทคนิค RAIM-FDE

เมื่อใช้เทคนิคที่อาศัย Mask ค่ามุมสูงจากภาพฟิซายพบว่าค่าคลาดเคลื่อน RMS ในทิศทางดิ่งลดลงถึงร้อยละ 44.85 (7.54 เมตร) อย่างไรก็ตามค่า RMSE ในทางราบกลับเพิ่มขึ้นร้อยละ 21.16 (1.64 เมตร) เนื่องจากเกิดค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ที่มากกว่า 20 เมตรเกิดขึ้นในทิศทางราบ (รูปที่ 4-8) ซึ่งมีสาเหตุจากทิศทางของวัตถุที่บังดวงดาวเทียม ส่งผลให้ดาวเทียมที่อยู่ในทิศทางราบถูกตัดออก นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงจำนวนดาวเทียมที่รับได้ในข้อมูลค่าสังเกตพบว่ามีจำนวนดาวเทียมเฉลี่ยเพียง 7 ดวง ดังนั้นการตัดสัญญาณดาวเทียมด้วย Mask จากภาพฟิซายส่งผลให้มีจำนวนดาวเทียมคงเหลือต่ำกว่า 5 ดวง และจำนวนสัญญาณถูกตัดออกมากกว่าร้อยละ 50 (รูปที่ 4-9)

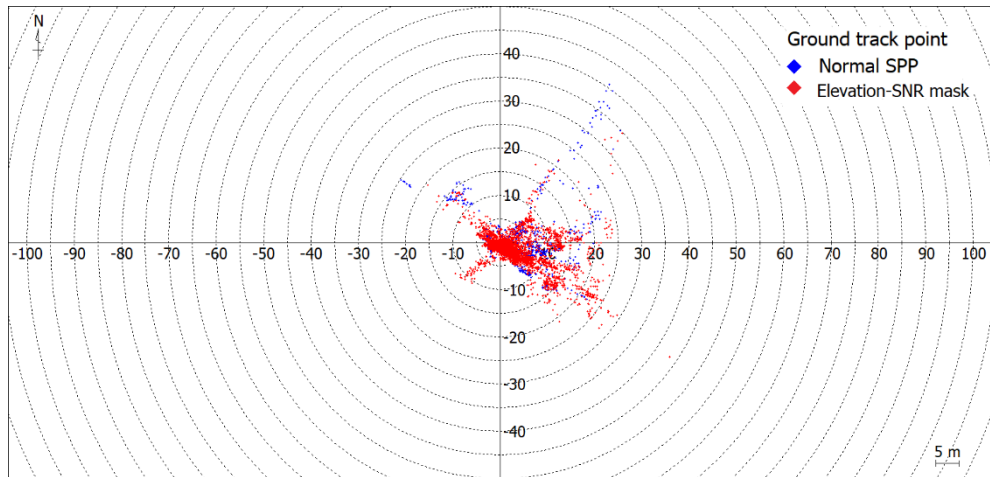


รูปที่ 4-8 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคที่อาศัยภาพฟิชอาย

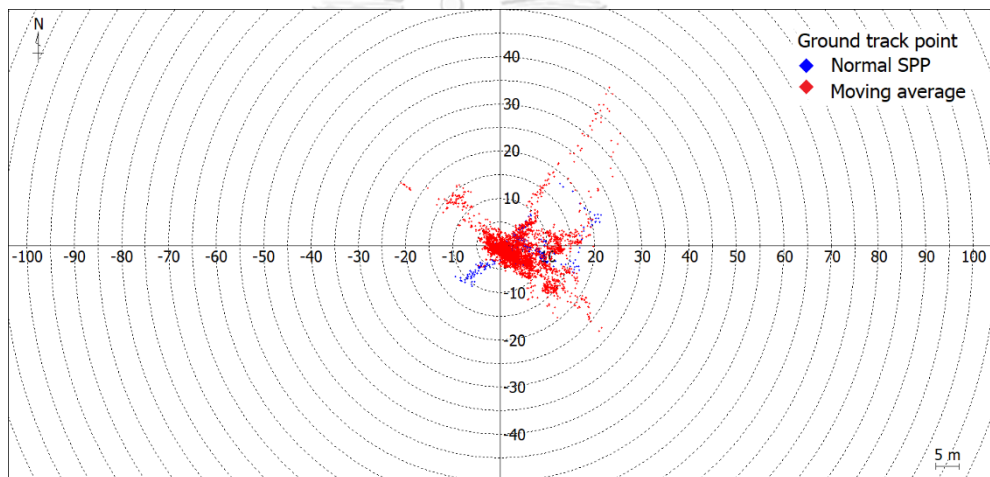


รูปที่ 4-9 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนดาวเทียมจากวิธีแบบพื้นฐานและเทคนิคที่อาศัยภาพฟิชอาย

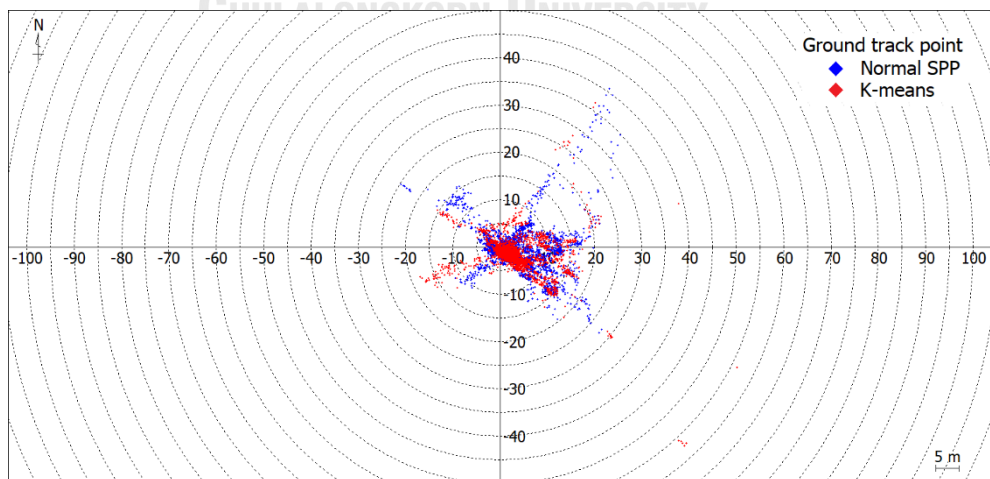
ผลจากเทคนิคตัดสัญญาณโดยอาศัยข้อมูลค่าสังเกตของค่า SNR 3 วิธี ในวิธีแรกเมื่อใช้เทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียมโดยใช้ค่า SNR Threshold ที่ 10 เดซิเบล เฮอร์ตลบออกจากค่าเฉลี่ย (รูปที่ 4-10) ผลพบว่าค่า RMSE ลดลงทั้งในทางราบและทางตั้ง โดยเฉพาะในทางตั้ง ค่า RMSE ลดลงร้อยละ 18.10 (3.05 เมตร) ในขณะที่ในทิศทางราบลดลงร้อยละ 0.65 (0.05 เมตร) ในวิธีที่สองเมื่อใช้เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า SNR โดยใช้ค่าเทรชโฮลด์ เท่ากับ 5 เดซิเบล เฮอร์ต (รูปที่ 4-11) พบว่าค่า RMSE ลดลงในระดับมิลลิเมตร โดยในทิศทางราบลดลงร้อยละ 0.77 (0.06 เมตร) ในขณะที่ในทิศทางตั้งค่า RMSE เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.30 (0.05 เมตร) สำหรับในวิธีสุดท้ายโดยใช้วิธีการตัดสัญญาณจากดาวเทียม NLOS โดยอาศัยการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือของค่า SNR ด้วยวิธี K-means (รูปที่ 4-12) ผลการทดสอบพบว่า ค่า RMSE ในทิศทางตั้งเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 36.80 (6.20 เมตร) ในทางกลับกันค่า RMSE ในทางราบลดลงร้อยละ 1.16 (0.09 เมตร)



รูปที่ 4-10 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR

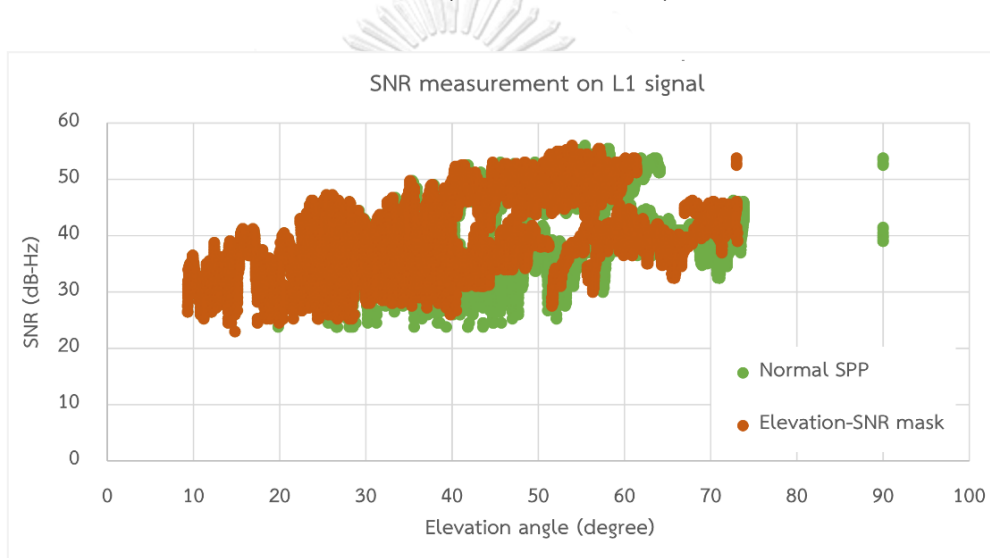


รูปที่ 4-11 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

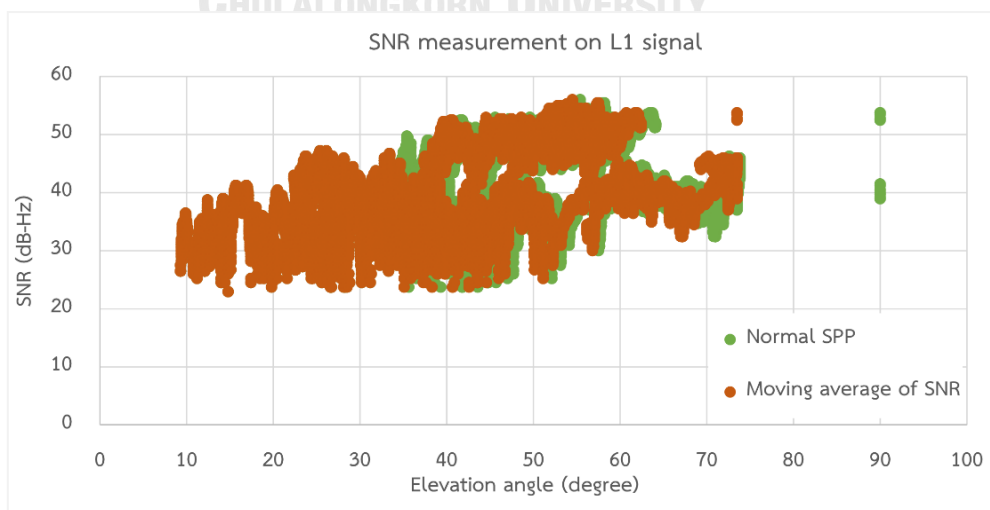


รูปที่ 4-12 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคจัดกลุ่มด้วย K-means

เมื่อพิจารณาการตัดสัญญาณจากค่า SNR ต่อผลลัพธ์ค่าคลาดเคลื่อนที่ได้รับโดยใช้เทคนิคทั้ง 3 วิธี พบว่าโดยใช้เทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR สามารถลดค่า RMSE ในทิศทางราบได้ประมาณ 3 เมตร เนื่องจากการตัดค่า SNR ที่แตกต่างกันตามช่วงค่ามุมสูงทำให้ลักษณะสัญญาณมีความเรียบขึ้นจากการตัดค่าที่มีความกว้างออก โดยเฉพาะการผันผวนของค่า SNR ในสัญญาณที่มีผลจากคลื่นหลายวิถีที่เกิดขึ้นในค่ามุมสูงที่ 40 ถึง 80 องศา (รูปที่ 4-13) ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาผลจากเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ การตัดสัญญาณจากค่า SNR แทบไม่แตกต่างจากวิธีแบบพื้นฐาน (รูปที่ 4-14) เนื่องจากเมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า SNR ในช่วงเวลาทุก 5 วินาทีพบว่า ค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 3 เดซิเบลเอิร์ต ดังนั้นเมื่อกำหนดค่าเทรชโฮลด์ ที่ 5 เดซิเบลเอิร์ต ส่งผลให้ค่าคลาดเคลื่อน RMSE ในทางราบและทางดิ่งลดลงไม่มากนัก (ไม่เกิน 6 มิลลิเมตร)

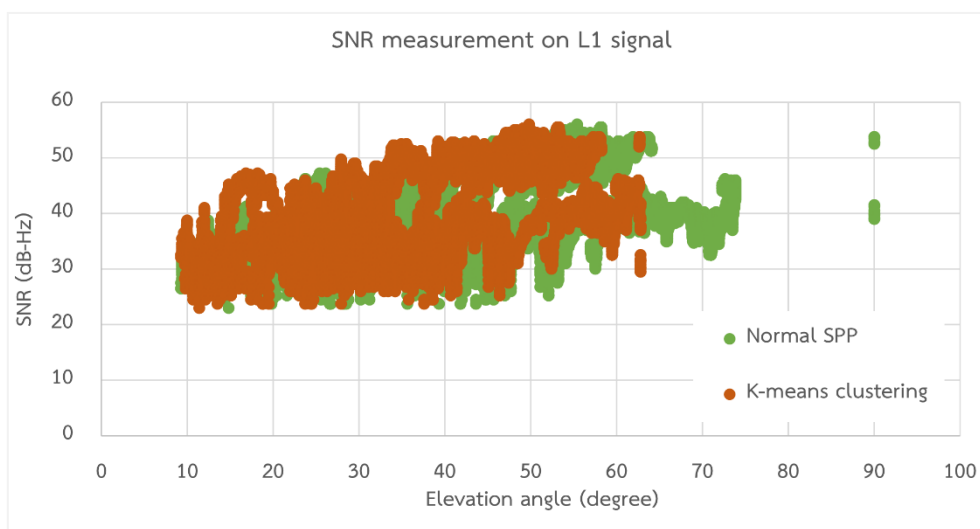


รูปที่ 4-13 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม



รูปที่ 4-14 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR

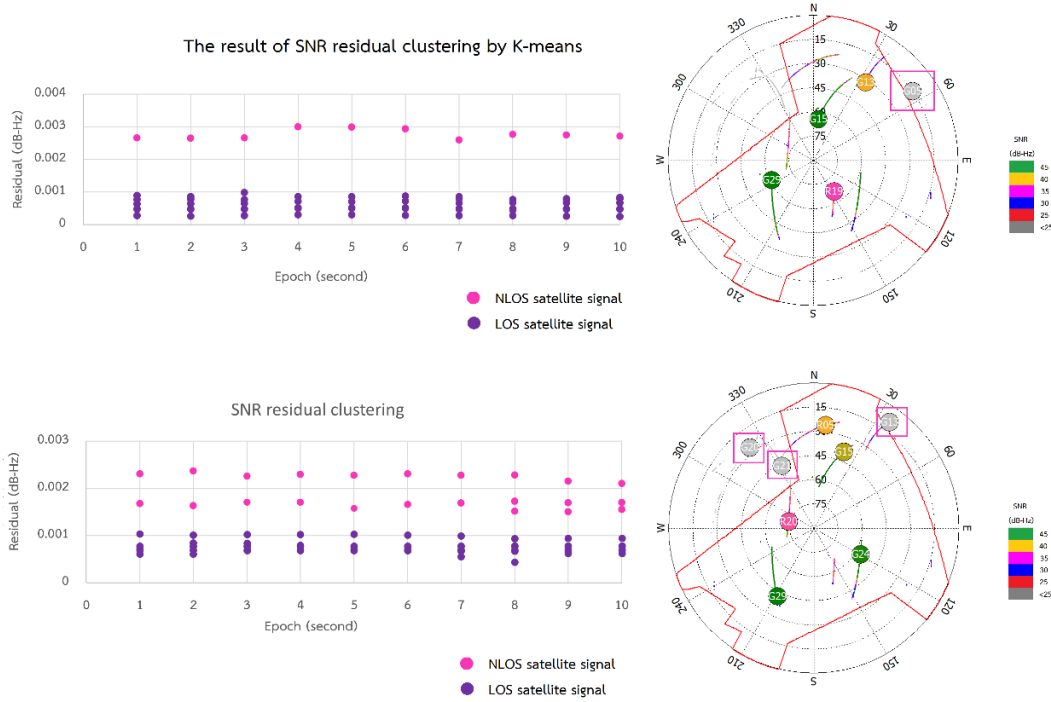
สำหรับเทคนิคที่อาศัยการจัดกลุ่มด้วยวิธี K-means พบว่าจากการตัดสัญญาณที่มีผลจากคลื่นหลายวิถีออกทำให้ลักษณะข้อมูล SNR มีความเรียบขึ้น แม้ว่าในค่ามุมสูงที่ 10 ถึง 20 องศา ค่า SNR มีความกว้างขึ้นจากเดิมเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเนื่องจากจำนวนดาวเทียมที่รับได้โดยเฉลี่ยเท่ากับ 7 ดวง ดังนั้นการตัดดาวเทียมมากกว่า 2 ดวงในบาง Epoch รวมถึงสัญญาณที่ถูกตัดออกทั้งหมดในค่ามุมสูงที่มากกว่า 65 องศา (รูปที่ 4-15) ส่งผลให้ค่า RMSE ในทางดิ่งเพิ่มสูงขึ้นถึง 6 เมตร



รูปที่ 4-15 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือด้วย K-means

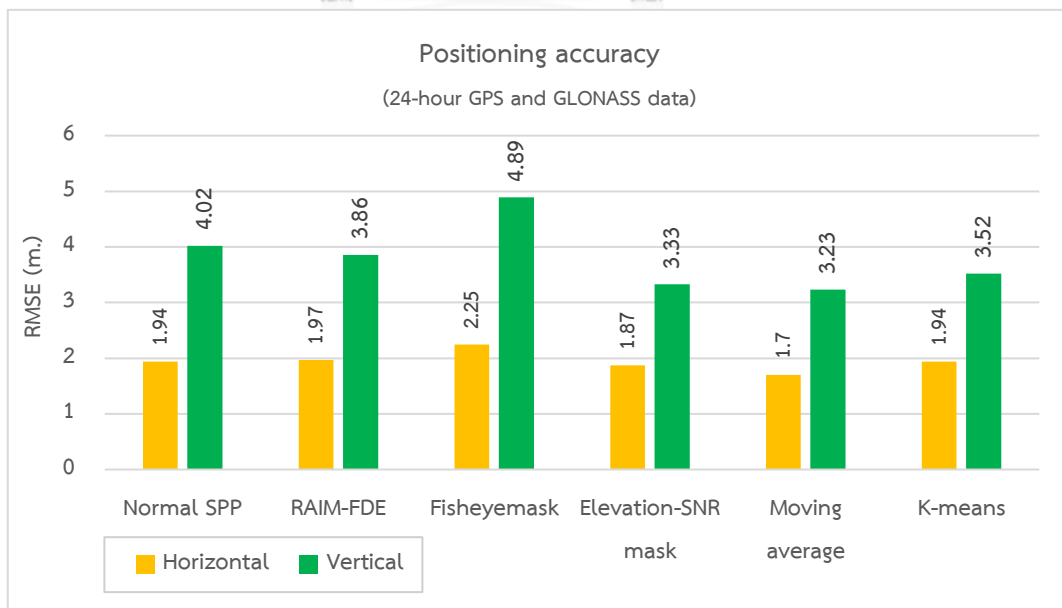
ผลจากการจัดกลุ่มดาวเทียมด้วยค่าเศษเหลือพบว่า ค่าเศษเหลือที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างระหว่างข้อมูล 2 กลุ่ม ทำให้สามารถแยกกลุ่มได้อย่างชัดเจนโดยสามารถตรวจจับสัญญาณที่เป็นดาวเทียม NLOS ได้ 1 ถึง 3 ดวงต่อ Epoch

เมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องในการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือของวิธี K-means พบว่าเมื่อเปรียบเทียบผลกับเทคนิคที่อาศัยภาพพินิจอายุ ค่าเศษเหลือที่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสัญญาณจากดาวเทียม NLOS มีผลตรงกับดาวเทียม NLOS ที่แสดงจากภาพ แสดงว่า K-means สามารถจัดกลุ่มได้อย่างถูกต้องดังแสดงในรูปที่ 4-16



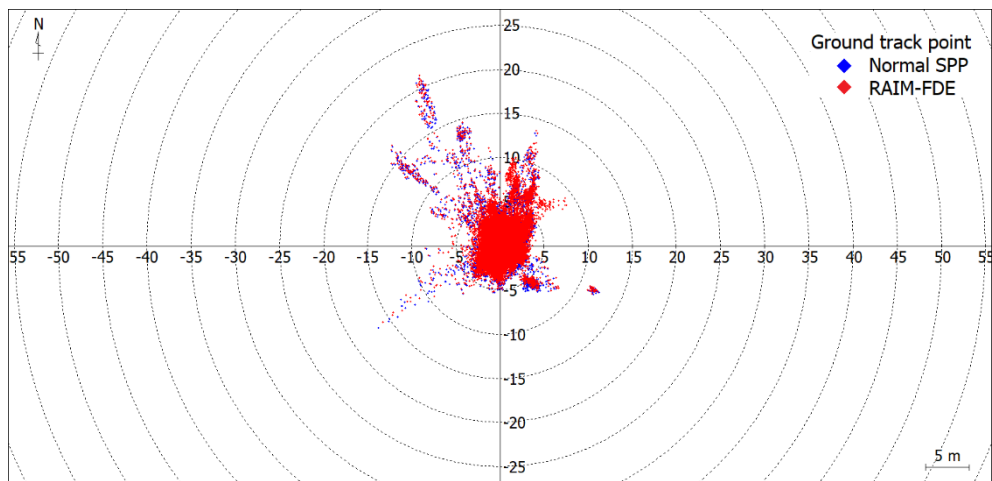
รูปที่ 4-16 แสดงผลการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือของค่า SNR ด้วยวิธี K-means ที่ถูกต้อง
 2) ผลการทดสอบด้วยข้อมูลจากจุดทดสอบที่ 2 (บริเวณตาดฟ้าอาคาร)

สำหรับผลการทดสอบด้วยข้อมูล 24 ชั่วโมง ผลค่า RMSE ในทิศทางราบและทางตั้งแสดง
 จากกราฟในรูปที่ 4-17 และมีรายละเอียดดังนี้

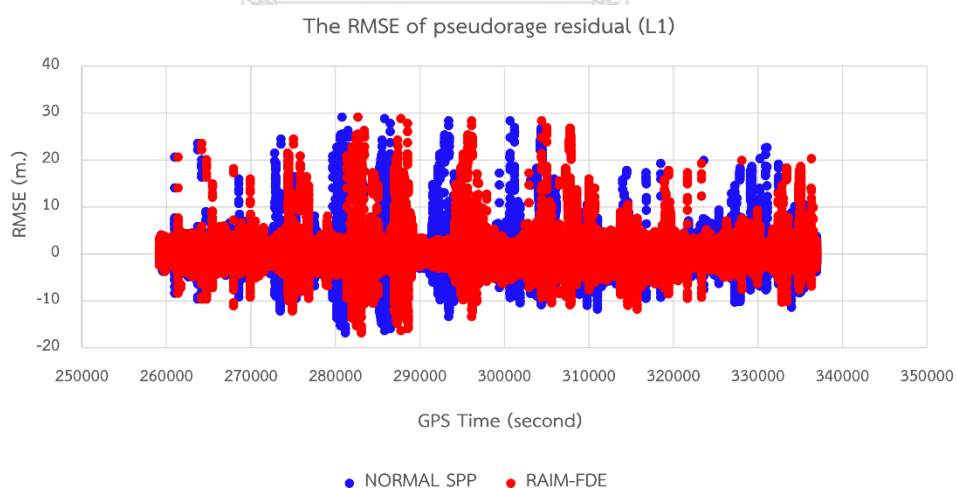


รูปที่ 4-17 แสดงค่า RMSE จากการทดสอบด้วยข้อมูลดาวเทียม 2 ระบบในจุดทดสอบที่ 2

ผลจากการใช้เทคนิค RAIM-FDE พบว่าค่า RMSE เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีแบบพื้นฐาน โดยในทิศทางราบเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.55 (0.03 เมตร) และในทิศทางดิ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.82 (0.28 เมตร) ดังแสดงในรูปที่ 4-18 เมื่อพิจารณาผลจากการตัดดาวเทียมต่อค่าเศษเหลือซูโดเรนจ์ พบว่า ไม่แตกต่างจากวิธีแบบพื้นฐานเนื่องจากการตัดดาวเทียมออกเพียง 1 ดวงไม่สามารถขจัดดาวเทียมที่มีผลจากคลื่นหลายวิถีได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงไม่สามารถทำให้ค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งลดลงได้ (รูปที่ 4-19)



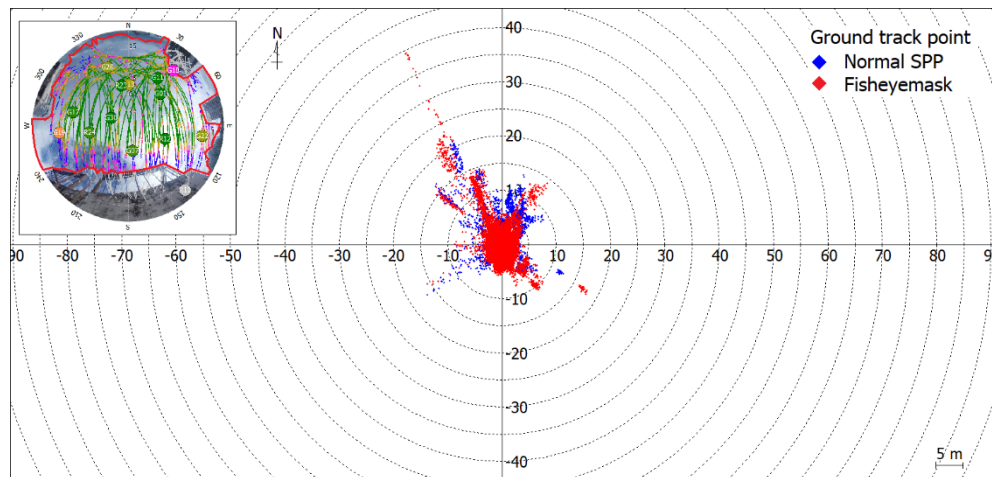
รูปที่ 4-18 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิค RAIM-FDE



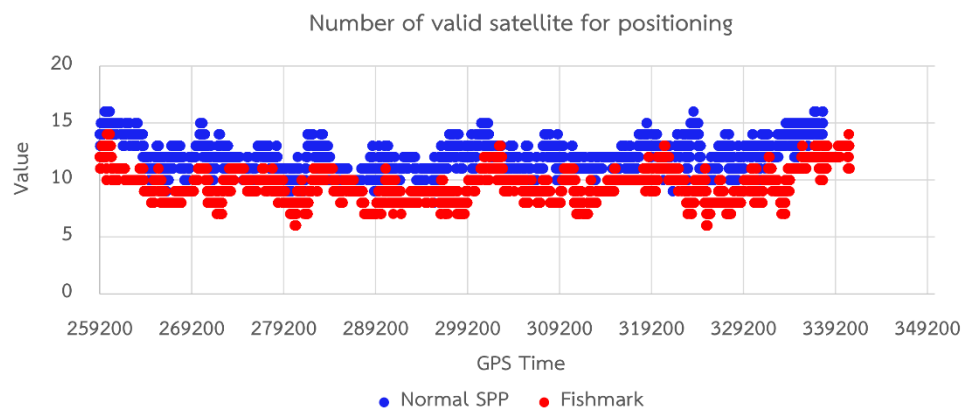
รูปที่ 4-19 แสดงการเปรียบเทียบค่าเศษเหลือซูโดเรนจ์จากวิธีแบบพื้นฐานและเทคนิค RAIM-FDE

เมื่อใช้เทคนิคตัดสัญญาณดาวเทียมจาก Mask ค่ามุมสูงโดยอาศัยภาพฟิซายพบว่า ค่า RMSE เพิ่มขึ้นทั้งในทางราบและทางดิ่ง (รูปที่ 4-20) โดยในทางราบเพิ่มขึ้นร้อยละ 15.98

(0.31 เมตร) และในทางดิ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 21.64 (0.87 เมตร) เมื่อพิจารณาการตัดดาวเทียมพบว่า สัญญาณดาวเทียมที่ถูกตัดออกส่วนใหญ่มาจากดาวเทียมที่อยู่ในทิศใต้ซึ่งเป็นผลจากการสะท้อนของสัญญาณใกล้กับกำแพงคอนกรีต ทำให้จำนวนดาวเทียมถูกตัดออกโดยเฉลี่ย 3 ดวง จากจำนวนดาวเทียมที่รับได้โดยเฉลี่ย 12 ดวง อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีการตัดดาวเทียมสูงสุดที่ 8 ดวง แต่ไม่มีช่วงเวลาใดที่มีดาวเทียมคงเหลือน้อยกว่า 6 ดวง



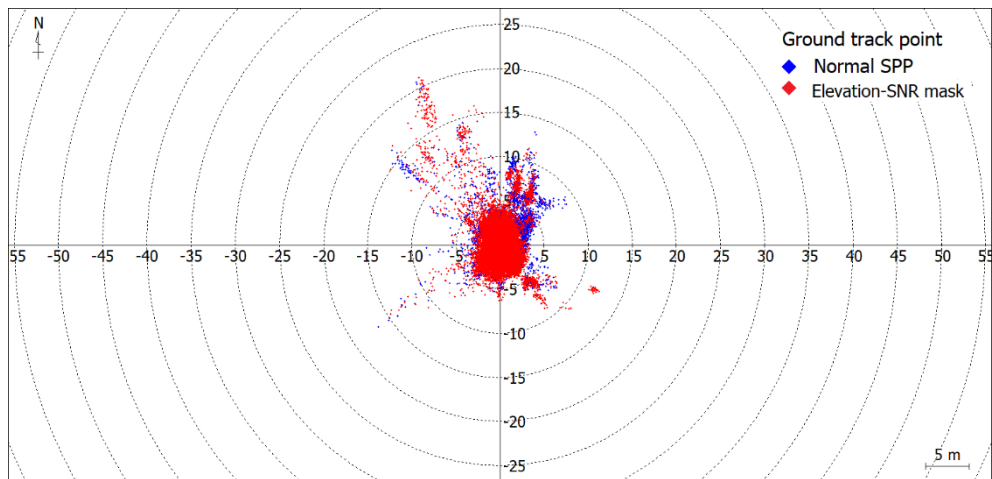
รูปที่ 4-20 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคที่อาศัยภาพฟิชอาย



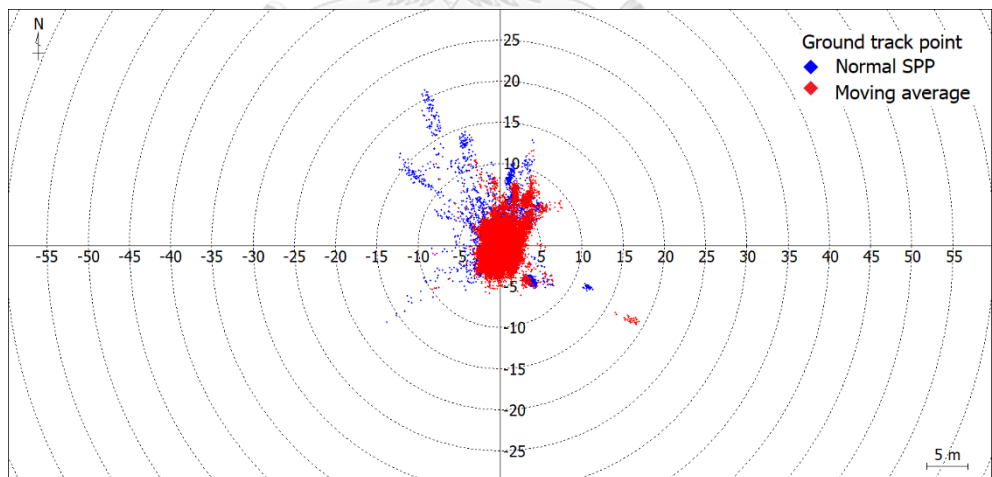
รูปที่ 4-21 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนดาวเทียมจากวิธีแบบพื้นฐานและเทคนิคที่อาศัยภาพฟิชอาย

ผลจากการใช้เทคนิคตัดสัญญาณโดยอาศัยข้อมูลค่า SNR 3 วิธี ในวิธีแรกโดยใช้เทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียมและกำหนดค่าเทรซโฮลด์ ที่ 10 เดซิเบลเฮิร์ตลบ ออกจากค่าเฉลี่ย ผลพบว่าค่า RMS ลดลงทั้งในทางราบและทางดิ่ง โดยในทางดิ่งลดลงร้อยละ 18.10 (0.69 เมตร) ในขณะที่ในทางราบลดลงร้อยละ 0.65 (0.07 เมตร) ดังแสดงในรูปที่ 4-22

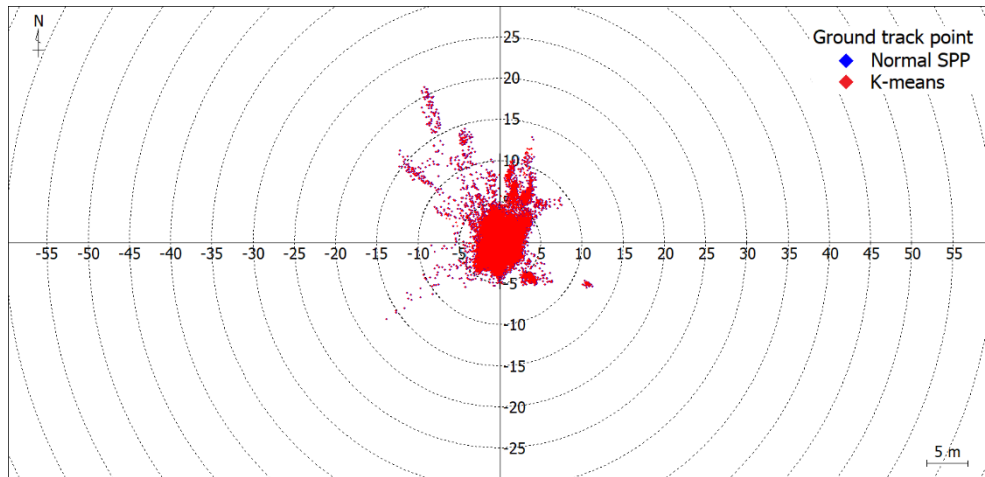
ในวิธีที่สองเมื่อใช้วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่และกำหนดค่าเทรซโฮลด์ เท่ากับ 3 เดซิเบลเฮิร์ต ผลพบว่าค่า RMSE ลดลงในทางราบร้อยละ 12.37 (0.24 เมตร) และลดลงในทางดิ่งร้อยละ 11.92 (0.35 เมตร) ดังแสดงในรูปที่ 4-23 สำหรับในวิธีสุดท้ายโดยใช้วิธีการตัดสัญญาณจากดาวเทียม NLOS โดยอาศัยการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือของค่า SNR ด้วยวิธี K-means (รูปที่ 4-24) ผลการทดสอบพบว่า ค่า RMS ในทิศทางราบแทบไม่เปลี่ยนแปลงจากวิธีแบบพื้นฐาน โดยลดลงร้อยละ 0.52 (0.01 เมตร) ในขณะที่ในทิศทางดิ่งค่า RMSE ลดลงร้อยละ 1.68 (0.06 เมตร)



รูปที่ 4-22 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR

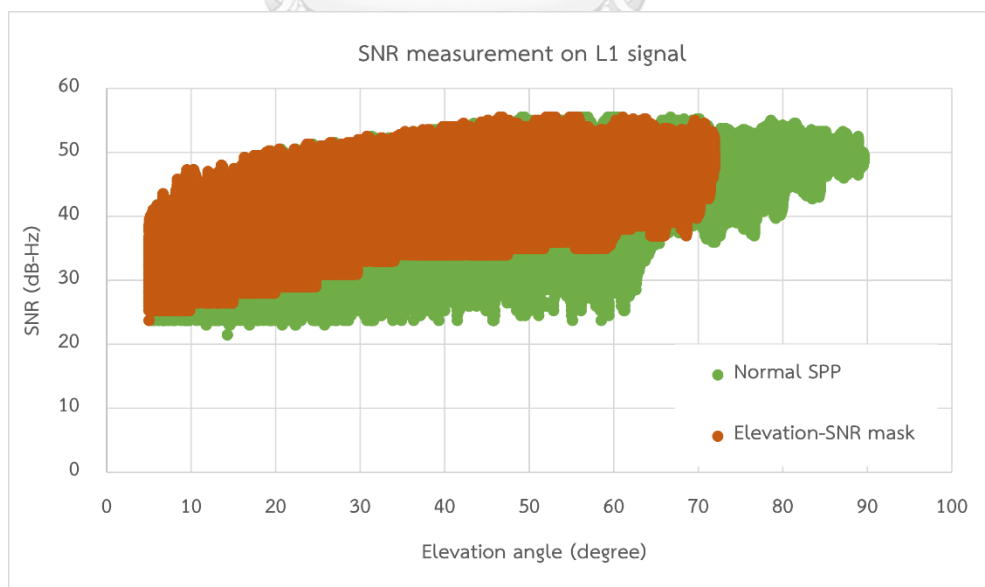


รูปที่ 4-23 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

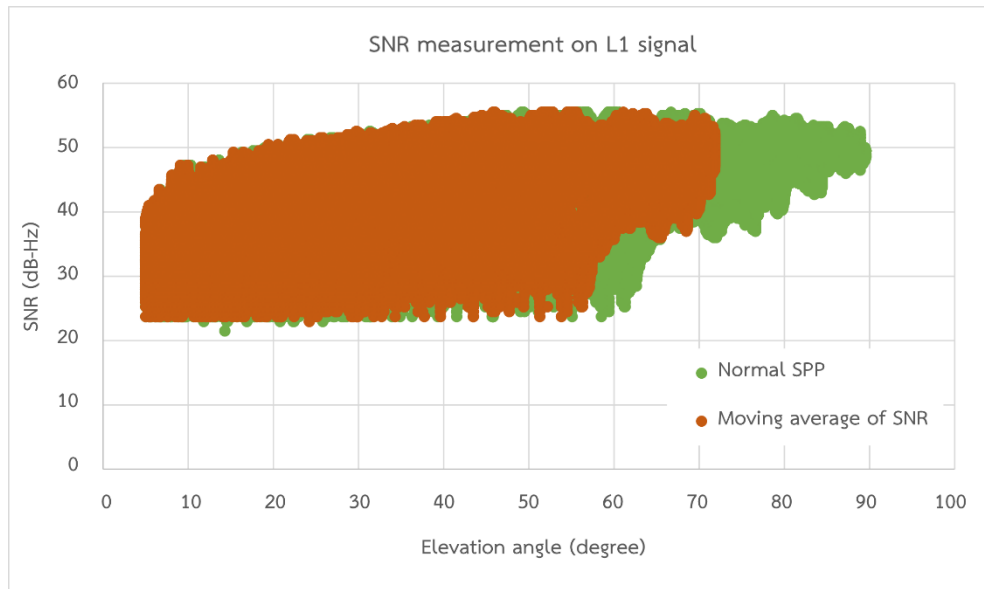


รูปที่ 4-24 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคจัดกลุ่มด้วย K-means

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ค่า RMSE ที่ได้จาก 3 เทคนิคข้างต้นพบว่าเทคนิคการใช้ค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียมให้ผลที่ดีที่สุดเนื่องจากเมื่อพิจารณาจากค่า SNR พบว่ามีการตัดค่าที่ผันผวนออกตั้งแต่ค่ามุมสูงที่ 5 องศาถึง 90 องศา (รูปที่ 4-25) ทำให้ลักษณะของข้อมูลค่า SNR ที่คงเหลือมีความราบเรียบขึ้นและส่งผลให้ค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งลดลง ในขณะที่ในเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (รูปที่ 4-26) ในค่ามุมสูงที่ 5 ถึง 58 องศาแทบจะไม่มี การตัดสัญญาณออกเนื่องจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าไม่เกินกว่าเทรชโฮลด์ อย่างไรก็ตามเมื่อมีการตัดสัญญาณในค่ามุมที่มากกว่า 58 องศา สามารถลดค่าคลาดเคลื่อนในทางราบและทางตั้งไม่เกิน 4 มิลลิเมตร

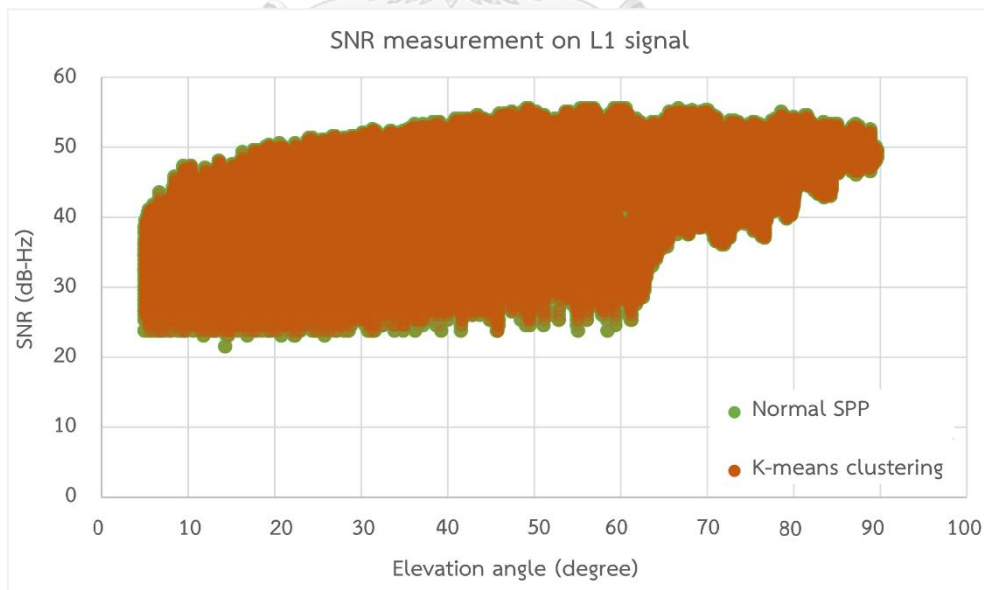


รูปที่ 4-25 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม



รูปที่ 4-26 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR

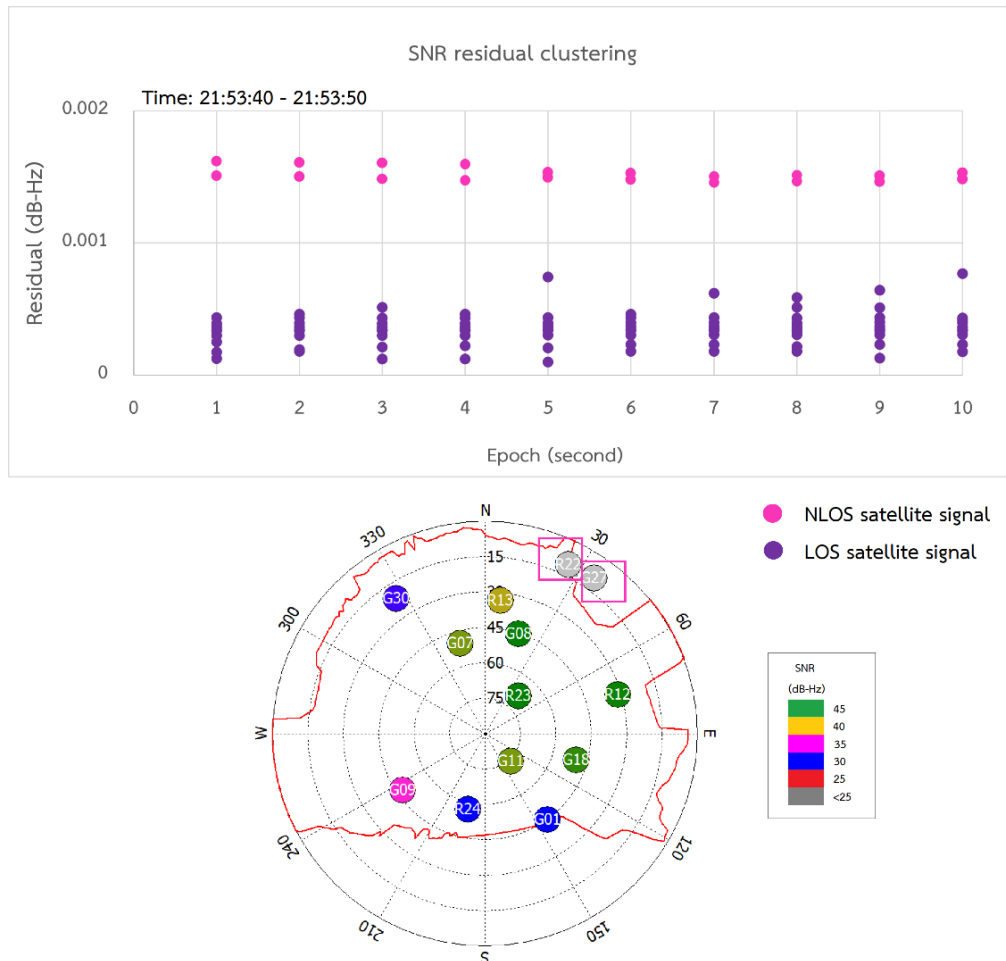
สำหรับการตรวจสอบผลค่า SNR จากการใช้เทคนิค K-means พบว่าค่า RMSE ลดลง ในทางราบและทางตั้งไม่เกิน 1 เซนติเมตร ซึ่งแทบไม่แตกต่างจากผลจากวิธีแบบพื้นฐานเมื่อทำการ ตรวจสอบค่า SNR พบว่าจากการตัดสัญญาณออก ค่าแทบไม่เปลี่ยนแปลงจากค่าที่วัดได้จริง ดังแสดง ในรูปที่ 4-27



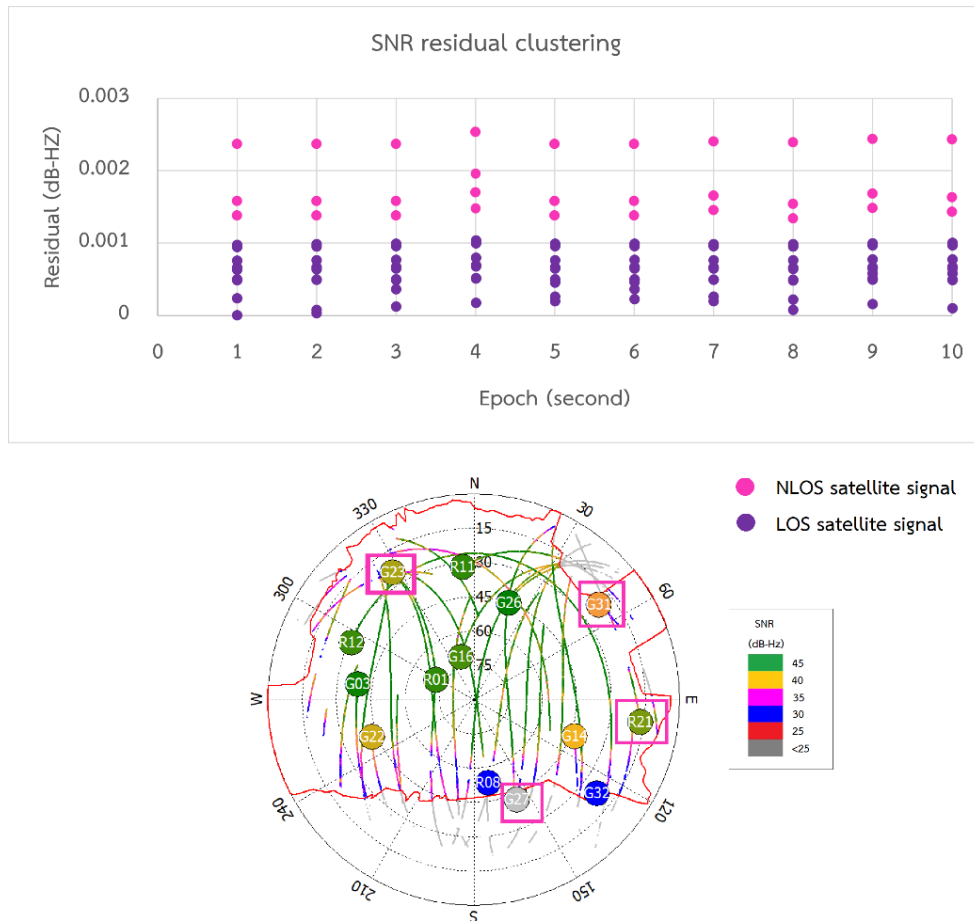
รูปที่ 4-27 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือด้วย K-means

เมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องในการจัดกลุ่มของค่าเศษเหลือพบว่าค่าเศษเหลือที่ คำนวณได้มีค่าแตกต่างระหว่างข้อมูล 2 กลุ่ม ทำให้สามารถแยกกลุ่มดาวเทียมได้ชัดเจน ในกรณีที่ผล

ระบุตัดดาวเทียม 1-2 ดวง เทคนิคนี้สามารถตัดสัญญาณจากดาวเทียม NLOS ได้อย่างถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบผลชนิดดาวเทียมจากภาพพิกซาย (รูปที่ 4-28) อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้มีข้อจำกัดใน 2 กรณีคือ ในกรณีที่มีการระบุตัดดาวเทียมมากกว่าหรือ 3 ดวง สามารถตรวจจับได้เพียงบางดวง นอกจากนี้เมื่อจำนวนดาวเทียมที่ถูกระบุให้ตัดออกทำให้ดาวเทียมคงเหลือต่ำกว่า 6 ดวง สัญญาณดาวเทียมทั้งหมดใน Epoch นั้นจะถูกตัดออกทั้งหมด



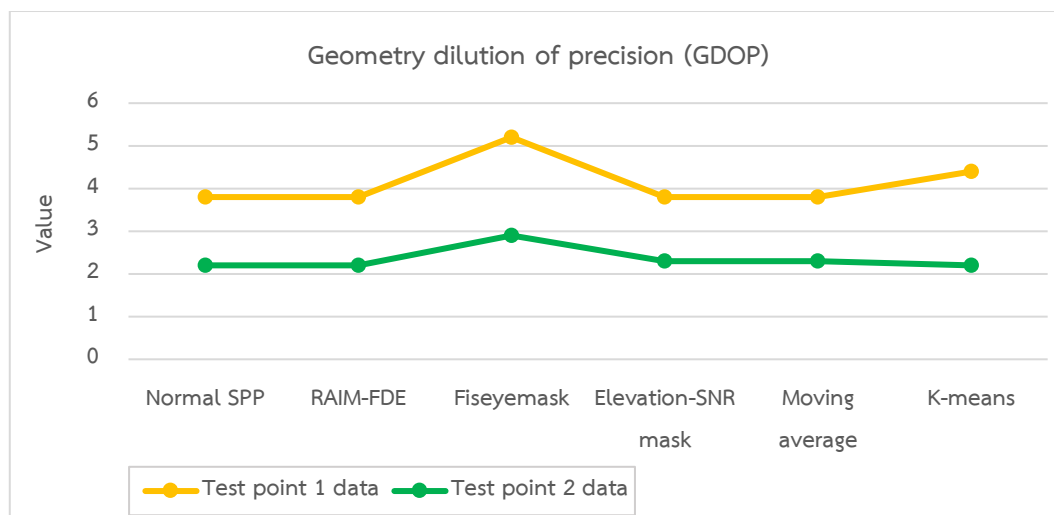
รูปที่ 4-28 แสดงตัวอย่างผลการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือด้วย K-means ที่ถูกต้อง



รูปที่ 4-29 แสดงตัวอย่างผลการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือด้วย K-means ที่ไม่ถูกต้อง

4.2.2 ผลลัพธ์ค่าเรขาคณิตดาวเทียม

จากการตัดสัญญาณดาวเทียมต่อการเปลี่ยนแปลงของของค่าเรขาคณิตดาวเทียมโดยพิจารณาจากค่า GDOP แสดงจากกราฟในรูปที่ 4-30 ผลแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า GDOP สามารถแบ่งกลุ่มได้ 3 ระดับ คือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง, เพิ่มขึ้นในระดับต่ำและเพิ่มขึ้นในระดับปานกลาง จากการทดสอบด้วยข้อมูล 2 ชุดพบว่าโดยใช้เทคนิค RAIM ค่า GDOP ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากวิธีแบบพื้นฐาน เมื่อใช้ เทคนิคที่อาศัยค่าเฉลี่ยของค่า SNR, เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ ค่า GDOP มีการเพิ่มขึ้นสูงสุดไม่เกินร้อยละ 5 ในขณะที่เทคนิค K-means ค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดไม่เกินร้อยละ 16 สำหรับเทคนิคที่อาศัยภาพฟิซายซึ่งมีการตัดดาวเทียมจำนวนมากที่สุดส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของค่า GDOP โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 34



รูปที่ 4-30 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่า GDOP

4.2.3 ผลลัพธ์การขจัดสัญญาณคลื่นหลายวิถี

ผลการประเมินความสามารถในการขจัดคลื่นหลายวิถีโดยพิจารณาจากร้อยละของอัตราการตัดสัญญาณจากดาวเทียม NLOS เปรียบเทียบกับเทคนิคที่อาศัยภาพพิซอาย ผลแสดงดังนี้

ตารางที่ 4-1 แสดงอัตราการตัดสัญญาณจากดาวเทียม NLOS ด้วยข้อมูลดาวเทียม 2 ระบบ

Data	Method	NLOS exclusion rate
GPS & GLONASS (Test point 1)	Fisheye mask	100% (10304/10304)
	RAIM-FDE	3.08% (317/10304)
	Avg.SNR	9.12 (940/10304)
	Moving average	5.81 (599/10304)
	K-means	33.26 (3427/10304)
GPS & GLONASS (Test point 2)	Fisheye mask	100% (213241/213241)
	RAIM-FDE	3.25% (6928/213241)
	Avg.SNR	23.65% (50435/213241)
	Moving average	23.91% (50992/213241)
	K-means	80.52% (171135 /213241)

จากตารางที่ 4-1 ผลแสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการตรวจจับสัญญาณดาวเทียม NLOS กับเทคนิคที่อาศัยภาพพิซอายที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด เทคนิคที่อาศัยข้อมูลค่า SNR ทั้ง 3 วิธีสามารถตรวจจับสัญญาณ NLOS ได้ในระดับกลางคือไม่เกินร้อยละ 35 ในขณะที่เทคนิค RAIM-FDE มีประสิทธิภาพในการจับสัญญาณดาวเทียม NLOS ในระดับน้อยที่สุดคือไม่เกินร้อยละ 5

บทที่ 5

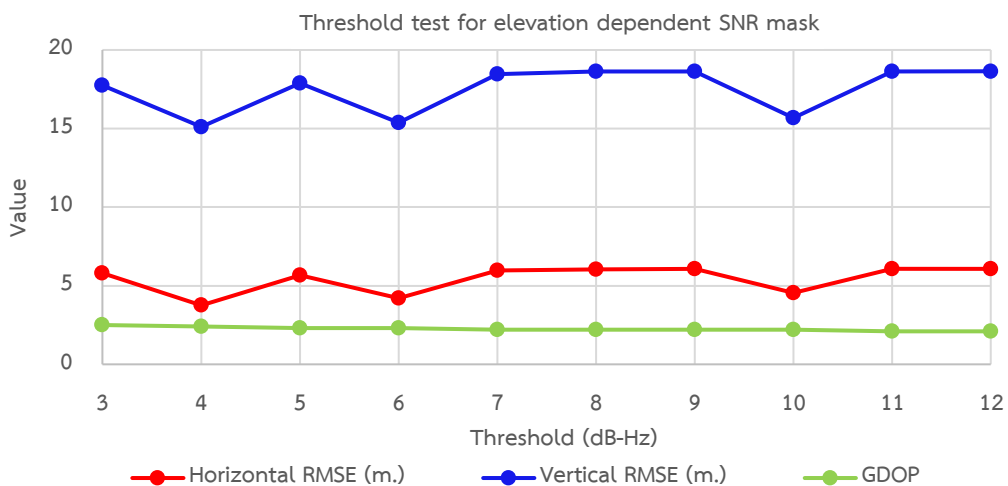
ผลการทดสอบด้วยข้อมูล GNSS แบบ 4 ระบบดาวเทียม

จากการทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคเลือกดาวเทียม 5 วิธี ในการลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีโดยใช้ข้อมูลความถี่เดียวจากดาวเทียม 4 ระบบ ได้แก่ GPS, GLONASS, Beidou และ Galileo ผลการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

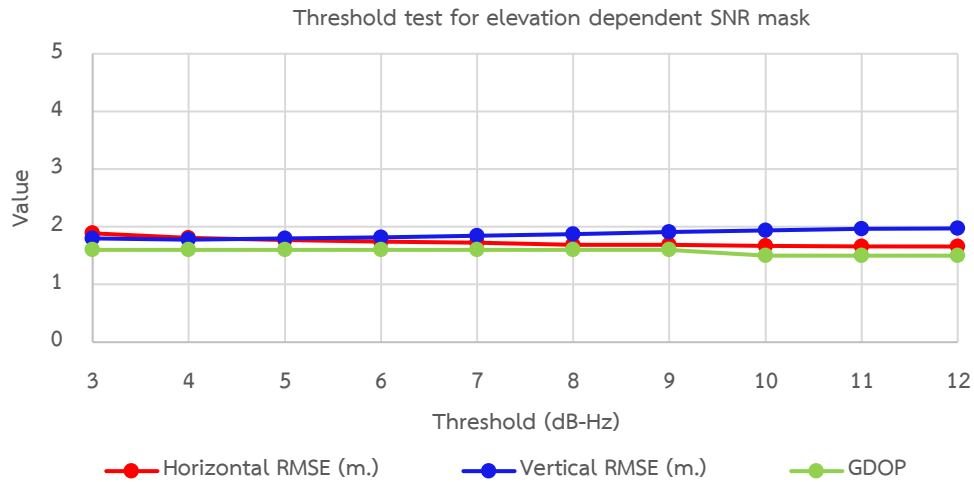
5.1 ผลการทดสอบหาค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมที่สุด

1) เทคนิคตัดดาวเทียมโดยอาศัยค่าเฉลี่ยของค่า SNR

การทดสอบได้กำหนดช่วงค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมเท่ากับ 3 ถึง 12 เดซิเบลเฮิร์ต เนื่องจากหากใช้ค่าที่ต่ำกว่า 3 เดซิเบลเฮิร์ต มีจำนวนสัญญาณดาวเทียมถูกตัดออกเกินกว่าร้อยละ 50 ทำให้ในบางขณะเวลารับสัญญาณไม่สามารถประมวลผลค่าตำแหน่งได้ ในทางตรงข้าม หากใช้ค่ามากกว่า 12 เดซิเบลเฮิร์ต พบว่าไม่มีการตัดสัญญาณออก ผลการทดสอบหาค่า RMSE ในทิศทางราบและทางตั้ง รวมถึงค่า GDOP ด้วยข้อมูลจากจุดทดสอบที่ 1 และ 2 แสดงจากกราฟในรูปที่ 5-1 และรูปที่ 5-2 ตามลำดับ เมื่อนำค่าเทรชโฮลด์ที่กำหนดลบออกจากค่าเฉลี่ยของค่า SNR ผลการทดสอบพบว่า ค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ผลค่า RMSE และค่า GDOP ดีที่สุดในทุกข้อมูลทดสอบเท่ากับ 10 เดซิเบลเฮิร์ต



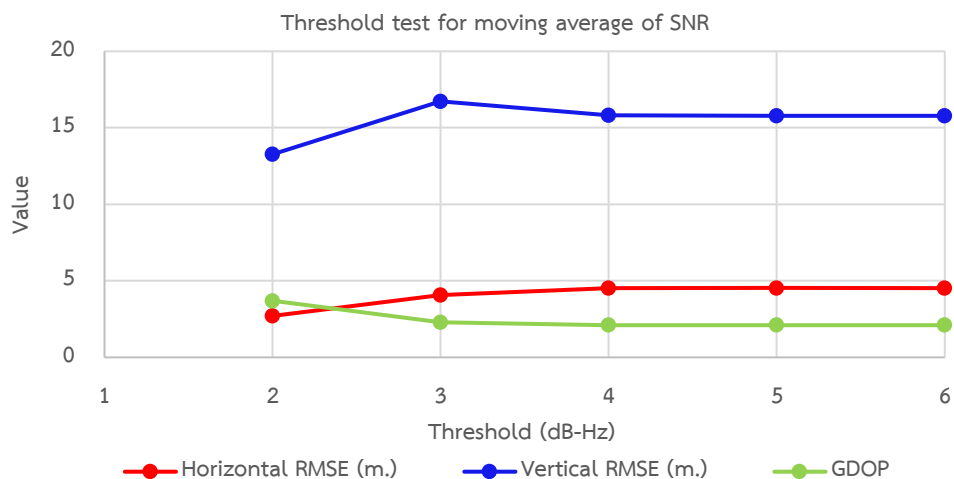
รูปที่ 5-1 แสดงผลทดสอบค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมในเทคนิคที่อาศัยค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียมด้วยข้อมูลในจุดทดสอบที่ 1



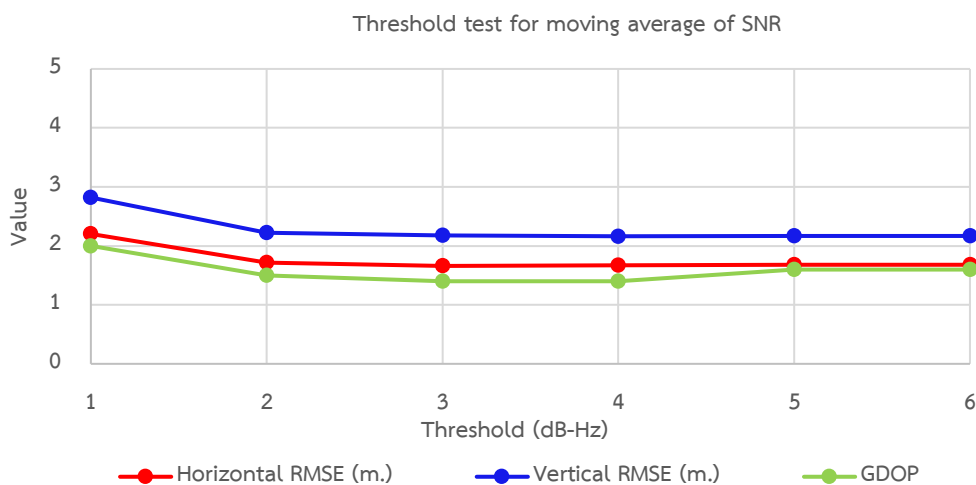
รูปที่ 5-2 แสดงผลทดสอบค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมในเทคนิคที่อาศัยค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูง
ดาวเทียมด้วยข้อมูลในจุดทดสอบที่ 2

2) เทคนิคตัดดาวเทียมโดยอาศัยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เมื่อวิเคราะห์ความผันผวนของค่า SNR จากการกระจายของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในช่วงเวลา 5 วินาทีพบว่ามีความสูงที่สุดไม่เกิน 6 และต่ำสุดคือ 0 ดังนั้นเพื่อทดสอบหาค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมที่สุดจึงได้กำหนดช่วงค่าให้เท่ากับ 1 ถึง 6 เดซิเบลเฮิร์ต ผลการทดสอบด้วยข้อมูลจากจุดทดสอบที่ 1 และ 2 แสดงจากกราฟในรูปที่ 5-3 และรูปที่ 5-4 ตามลำดับ



รูปที่ 5-3 แสดงผลทดสอบค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมในเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR ด้วยข้อมูล
ในจุดทดสอบที่ 1



รูปที่ 5-4 แสดงผลทดสอบค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมในเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR ด้วยข้อมูลในจุดทดสอบที่ 2

จากกราฟข้างต้น เมื่อนำค่าเทรชโฮลด์เปรียบเทียบกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า SNR ที่คำนวณได้และตัดสัญญาณที่มีค่า SNR เกินกว่าค่าเทรชโฮลด์ออก ผลการทดสอบพบว่า เมื่อกำหนดค่าเทรชโฮลด์ ที่ 3 เดซิเบลเฮิร์ต ให้ผลค่า RMSE และค่า GDOP ที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเมื่อกำหนดค่าเทรชโฮลด์เท่ากับ 1 และ 2 เดซิเบลเฮิร์ต มีสัญญาณถูกตัดออกเกินครึ่งหนึ่งของสัญญาณทั้งหมดที่รับได้ ทำให้เกิดสัญญาณขาดหายในบางช่วงเวลาและไม่สามารถคำนวณค่าตำแหน่งได้ ในทางตรงข้ามเมื่อกำหนดค่าเท่ากับ 5 และ 6 เดซิเบลเฮิร์ต พบว่าไม่มีการตัดสัญญาณออก

5.2 ผลการทดสอบด้วยการประมวลผลแบบจุดเดียว

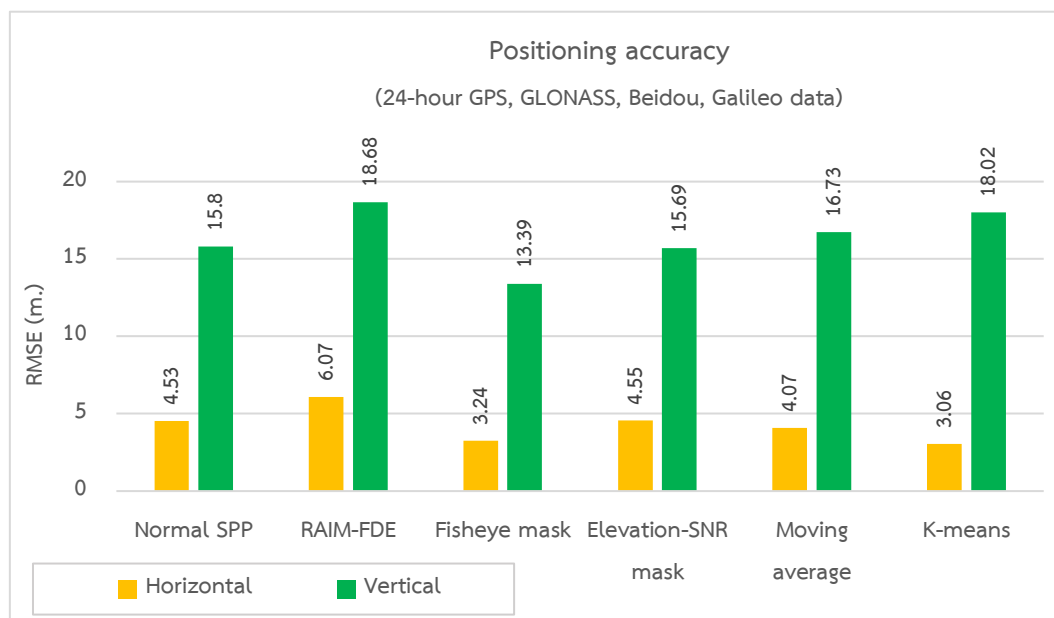
ผลการทดสอบแบ่งตามเกณฑ์ในการประเมินผล 3 หัวข้อ ได้แก่ ผลลัพธ์ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่ง, ผลลัพธ์ความถูกต้องเชิงเรขาคณิตดาวเทียมและผลลัพธ์ความถูกต้องในการตัดสัญญาณคลื่นหลายวิธี ดังมีรายละเอียดดังนี้

5.2.1 ผลลัพธ์ความถูกต้องเชิงตำแหน่ง

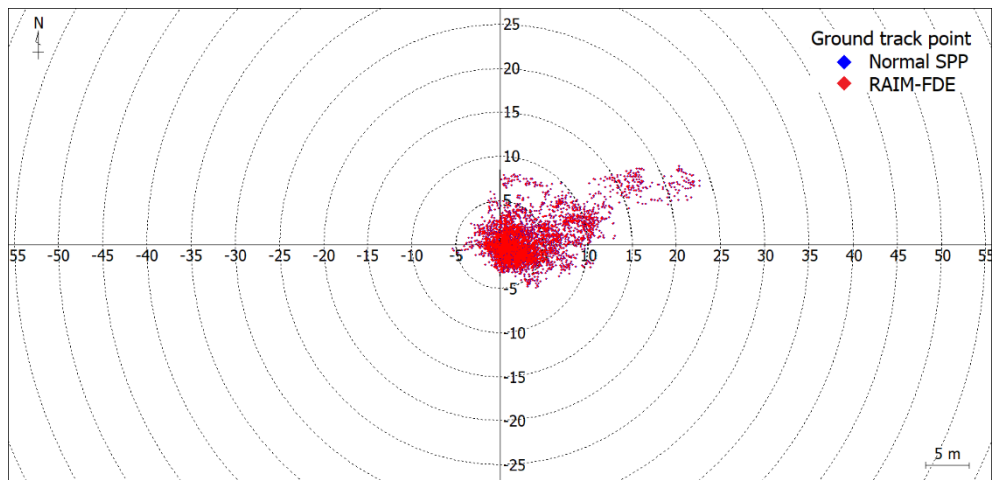
โดยพิจารณาจากผลค่า RMSE ในทิศทางราบและทางตั้ง ผลลัพธ์ที่ได้แบ่งตามข้อมูลทดสอบแสดงดังนี้

- 1) ผลการทดสอบด้วยข้อมูลจากจุดทดสอบที่ 1 (บริเวณหน้าอาคาร)

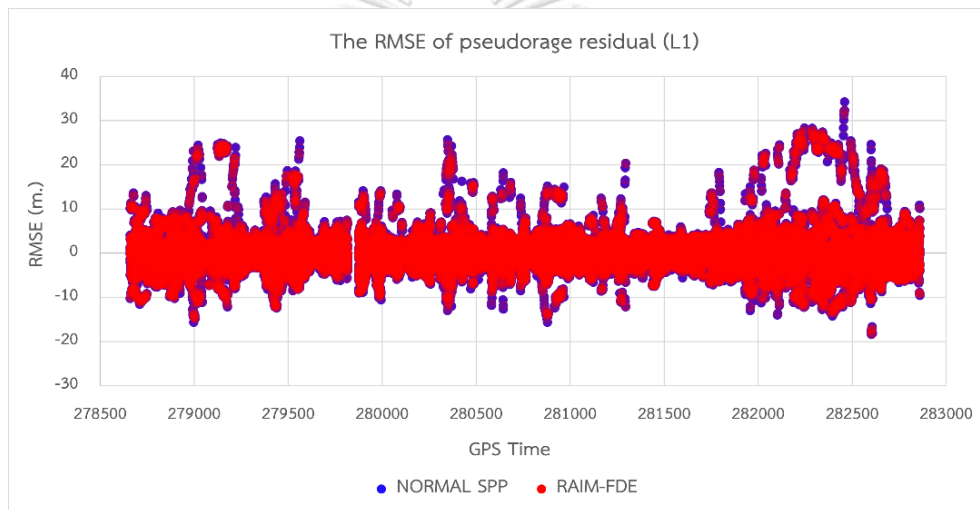
โดยใช้ข้อมูลความถี่เดียวจากการรับสัญญาณดาวเทียม GPS, GLONASS, Beidou และ Galileo ในจุดทดสอบที่ 1 บริเวณหน้าอาคาร ผลค่า RMSE แสดงจากกราฟในรูปที่ 5-5



รูปที่ 5-5 แสดงค่า RMSE จากการทดสอบด้วยข้อมูลดาวเทียม 4 ระบบในจุดทดสอบที่ 1 ผลการทดสอบโดยใช้เทคนิค RAIM-FDE พบว่าค่า RMSE เพิ่มขึ้นในระดับเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5-6 โดยในทิศทางราบ ค่าคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 34.00 (1.54 เมตร) ในขณะที่ทิศทางตั้งเพิ่มขึ้นร้อยละ 18.23 (2.88 เมตร) เมื่อพิจารณาผลค่าเศษเหลือชูโดเรนท์โดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีแบบพื้นฐาน พบว่าแทบไม่แตกต่างกัน (รูปที่ 5-7) อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องในการตัดดาวเทียมของเทคนิค FDE พบว่าสาเหตุที่ค่า RMSE เพิ่มขึ้นมาจากการเลือกตัดดาวเทียม GPS ที่ไม่มีผลจากคลื่นหลายวิถีดวงเดิมซ้ำๆเป็นเวลาดำเนินการ 2 นาที ในขณะที่ดาวเทียมที่มีผลจากคลื่นหลายวิถีและให้ค่าเศษเหลือที่เป็นค่าโดดยังคงอยู่และไม่ถูกตัดออกส่งผลให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่คำนวณได้ลดลง

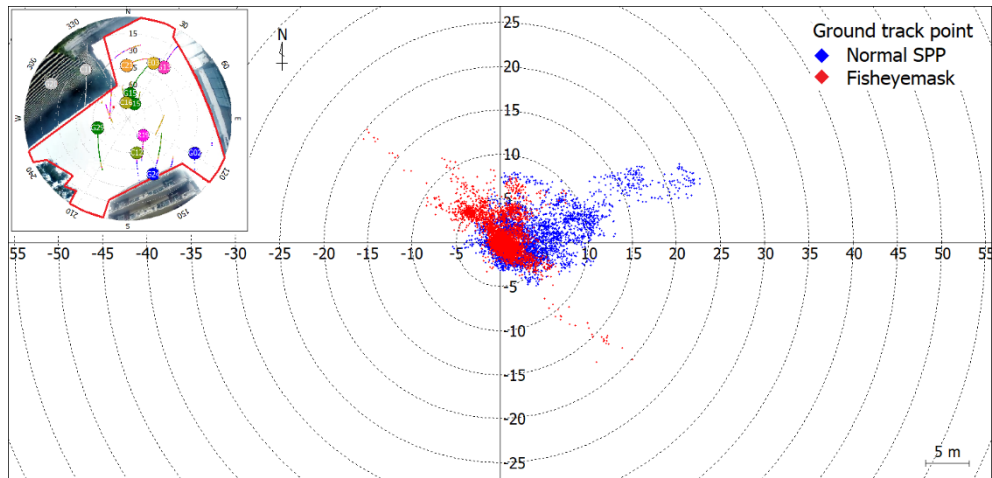


รูปที่ 5-6 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิค RAIM-FDE

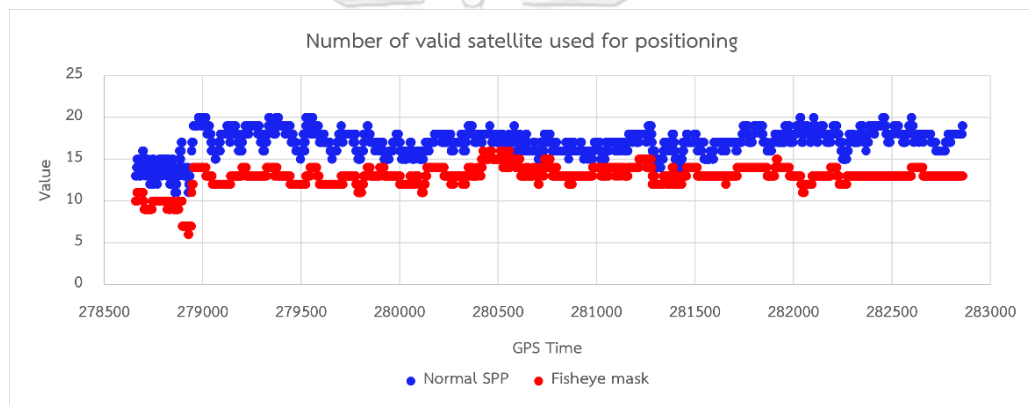


รูปที่ 5-7 แสดงการเปรียบเทียบค่าเศษเหลือซูโดเรนจ์จากวิธีแบบพื้นฐานและเทคนิค RAIM-FDE

ในเทคนิคการตัดสัญญาณโดยอาศัย Mask ค่ามุมสูงจากภาพฟิชอาย ผลพบว่าค่า RMSE ลดลงในระดับเมตร โดยในทิศทางราบลดลงร้อยละ 28.48 (1.29 เมตร) และในทางตั้งลดลงร้อยละ 15.25 (2.41 เมตร) ดังแสดงจากรูปที่ 5-8 เมื่อพิจารณาถึงจำนวนดาวเทียมพบว่าการรับสัญญาณจากดาวเทียมใน 4 ระบบทำให้มีจำนวนดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผลค่าตำแหน่งโดยเฉลี่ย 15 ดวง ดังนั้นเมื่อมีการตรวจจับและตัดดาวเทียม NLOS ออกโดยเฉลี่ย 3 ดวงและสูงสุด 7 ดวง จำนวนดาวเทียมคงเหลือที่ใช้ในการประมวลผลยังคงมากเพียงพอที่จะไม่ทำให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งลดลง

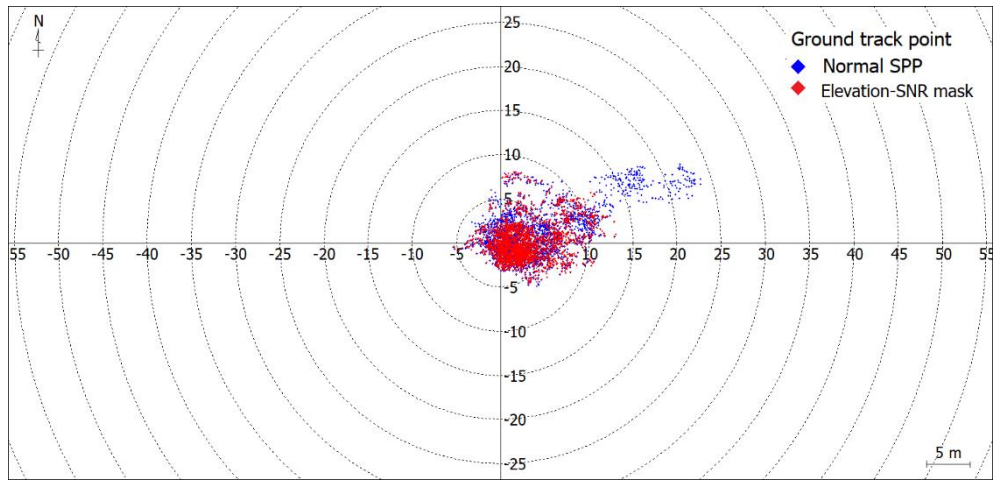


รูปที่ 5-8 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคที่อาศัยภาพพิกซาย

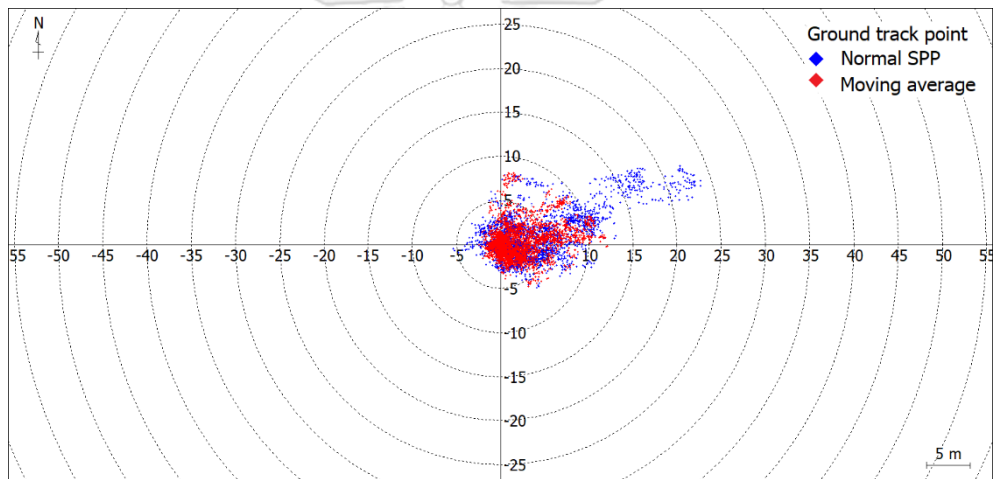


รูปที่ 5-9 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนดาวเทียมจากวิธีแบบพื้นฐานและเทคนิคที่อาศัยภาพพิกซาย สำหรับผลจากเทคนิคที่อาศัยค่า SNR ใน 3 วิธี ในวิธีแรกโดยใช้เทคนิคที่อาศัยค่าเฉลี่ยของค่า SNR และกำหนดค่าเทรชโฮลด์ เท่ากับ 10 เดซิเบลเอิร์ตลบจากค่าเฉลี่ย พบว่าค่า RMSE ในทางดิ่ง ลดลงร้อยละ 0.70 (0.11 เมตร) ในขณะที่ในทิศทางราบเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.44 (0.02 เมตร) ดังแสดงใน รูปที่ 5-10 เมื่อใช้วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า SNR โดยใช้ค่าเทรชโฮลด์ เท่ากับ 3 เดซิเบลเอิร์ต พบว่าค่า RMSE ในทางราบลดลงร้อยละ 10.15 (0.46 เมตร) อย่างไรก็ตามใน ทิศทางดิ่ง ค่า RMSE เพิ่มขึ้นร้อยละ 5.89 (0.93 เมตร) แสดงในรูปที่ 5-11

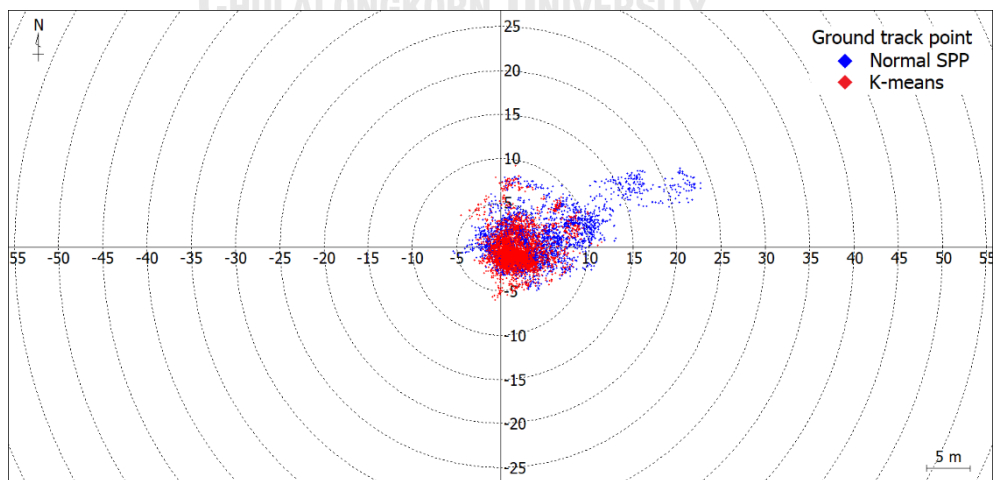
สำหรับวิธี K-means ผลค่า RMSE ในทิศทางราบลดลงร้อยละ 32.45 (1.47 เมตร) อย่างไรก็ตาม ในทิศทางดิ่ง ค่า RMSE เพิ่มขึ้นร้อยละ 14.05 (2.22 เมตร) แสดงดังรูปที่ 5-12



รูปที่ 5-10 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR

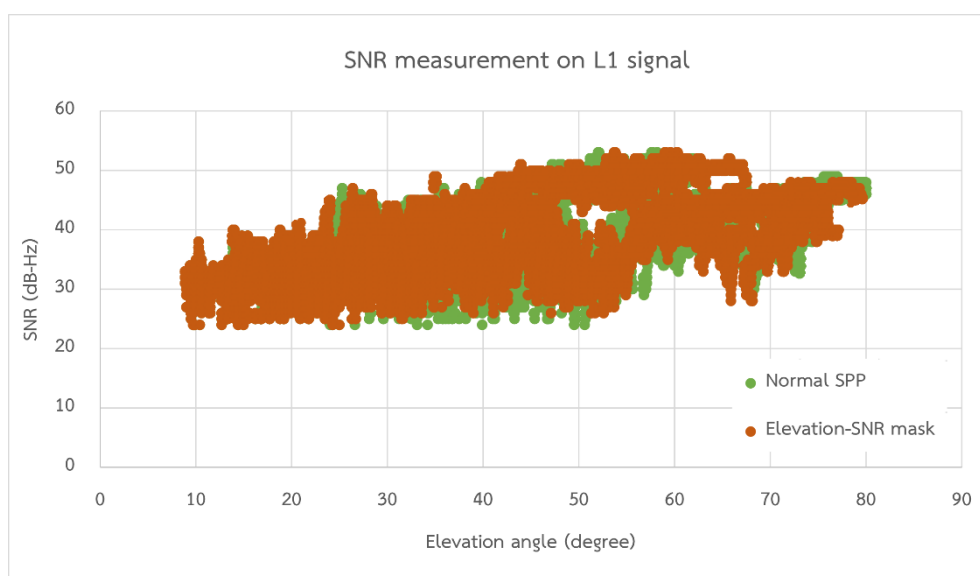


รูปที่ 5-11 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่



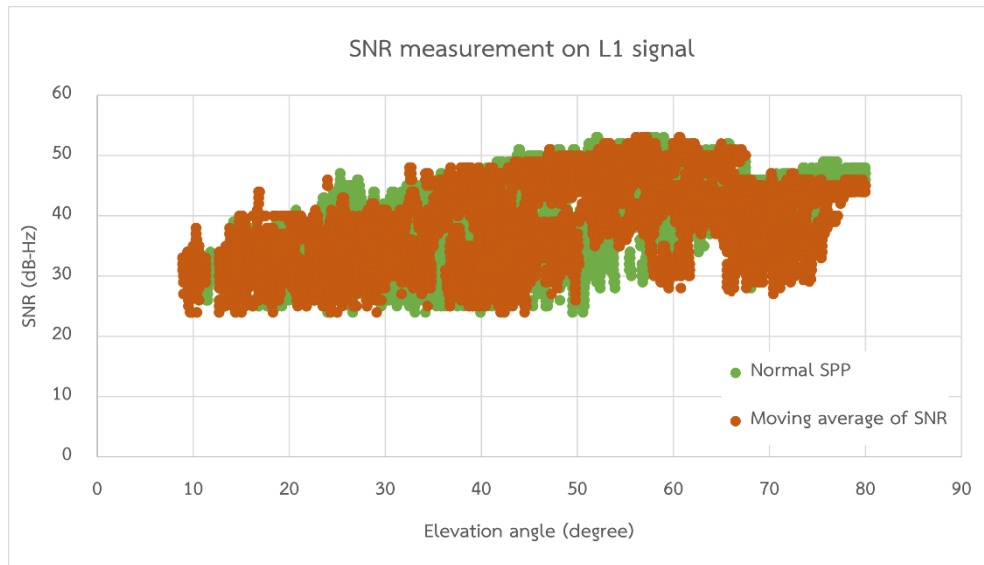
รูปที่ 5-12 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคจัดกลุ่มด้วย K-means

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลจากลักษณะการตัดสัญญาณจากค่า SNR พบว่าเมื่อใช้เทคนิคค่าเฉลี่ยที่สัมพันธ์กับค่ามมสูงดาวเทียม ผลลัพธ์ทางตำแหน่งแทบไม่ต่างผลที่ได้จากวิธีแบบพื้นฐานแม้ว่าค่าคลาดเคลื่อนในทางดิ่งจะลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการใช้ค่าเฉลี่ยที่คำนวณในแต่ละช่วงค่ามมสูงไม่สามารถลดความผันผวนของค่า SNR ซึ่งแปรผันตามเวลาได้ โดยเฉพาะในค่ามมสูงดาวเทียมตั้งแต่ 45 องศาขึ้นไป นอกจากนี้ในค่ามมสูงที่สูงมากกว่า 70 องศา มีการตัดสัญญาณในบางช่วงค่ามมเนื่องจากในบางระบบดาวเทียมไม่พบดาวเทียมในค่ามมสูงที่สูงทำให้ไม่สามารถหาค่าเฉลี่ยได้และไม่มีการตัดสัญญาณออก (รูปที่ 5-13)



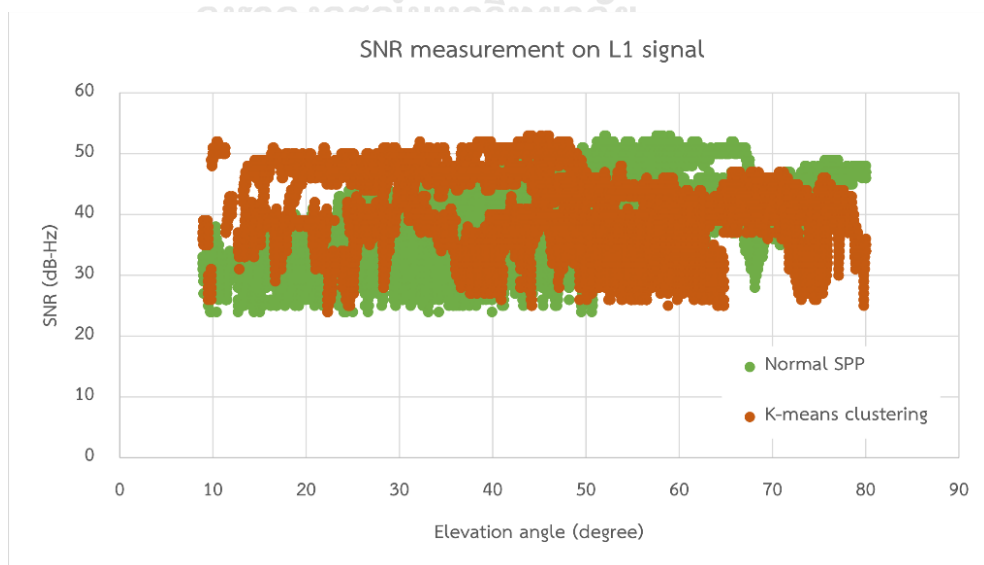
รูปที่ 5-13 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามมสูงดาวเทียม

สำหรับเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า SNR พบว่าสามารถลดความกว้างของค่า SNR ในค่ามมสูงที่ 30 ถึง 65 องศา ได้ดีกว่าในเทคนิคแรก อย่างไรก็ตามในค่ามมสูงที่สูงซึ่งมีความผันผวนของค่า SNR ต่ำ ทำให้ค่าที่วัดได้ไม่เกินกว่า Threshold ที่กำหนด ผลทำให้ไม่มีการตัดสัญญาณออก (รูปที่ 5-14)

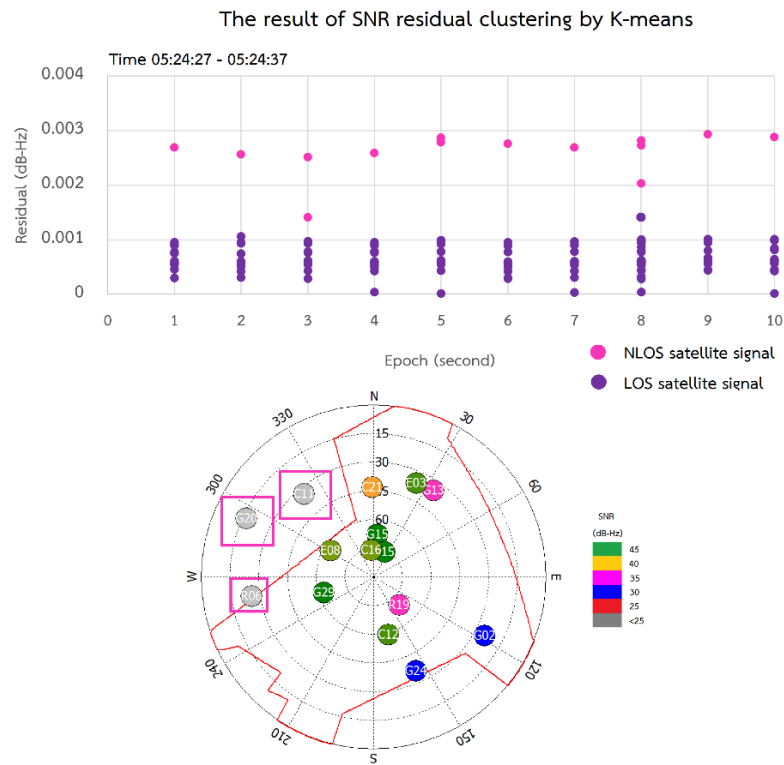


รูปที่ 5-14 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR

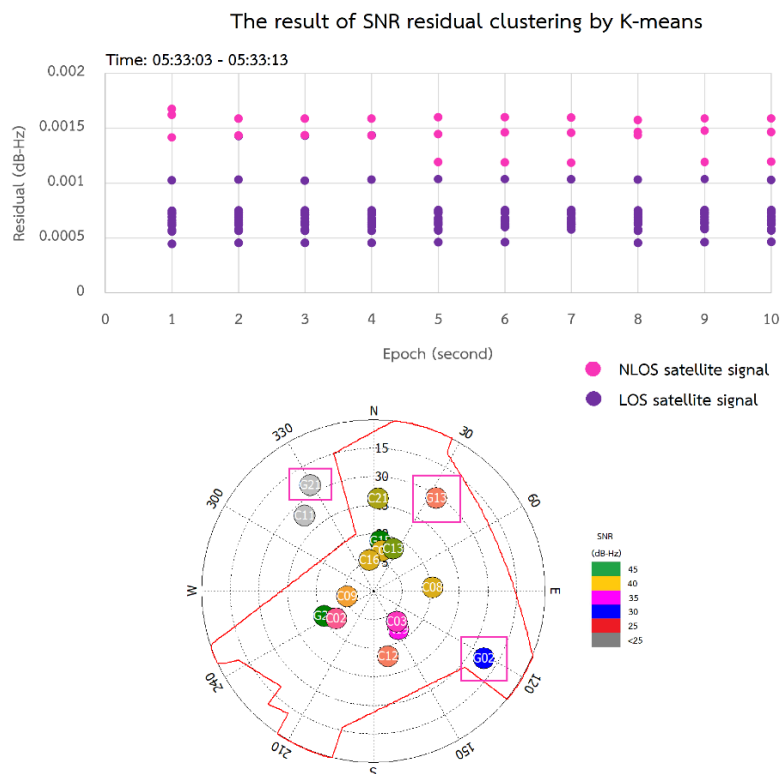
ในวิธีการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือด้วย K-means พบว่าลักษณะข้อมูล SNR มีความกว้างมากขึ้นจากข้อมูลจริงที่วัดได้เนื่องจากการตัดสัญญาณดาวเทียมออก 1 ถึง 3 ดวงในทุก Epoch (รูปที่ 5-15) เมื่อวิเคราะห์ผลการจัดกลุ่มดาวเทียมพบว่าค่าเศษเหลือที่คำนวณได้ค่อนข้างมีค่าแตกต่างระหว่างข้อมูล 2 กลุ่ม ทำให้สามารถแยกกลุ่มได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามเมื่อตรวจสอบความถูกต้องของการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือพบว่าเกิดขึ้นใน 2 กรณี คือสามารถตรวจจับดาวเทียม NLOS ได้ถูกต้องทั้งหมดในกรณีที่ค่าเศษเหลือที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างกันมาก (รูปที่ 5-16) และสามารถตรวจจับดาวเทียม NLOS ได้บางส่วนซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่ค่าเศษเหลือมีค่าใกล้เคียงกับกลุ่มดาวเทียม LOS (รูปที่ 5-17)



รูปที่ 5-15 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือด้วย K-means



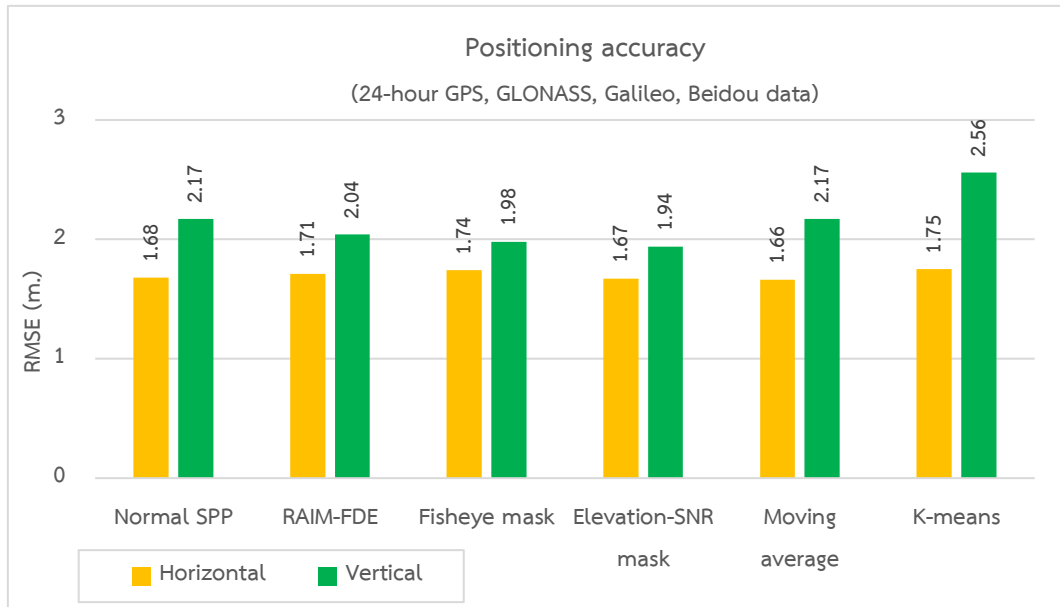
รูปที่ 5-16 แสดงผลการจัดกลุ่มชนิดดาวเทียมด้วยวิธี K-means ที่ถูกต้อง



รูปที่ 5-17 แสดงผลการจัดกลุ่มชนิดดาวเทียมด้วยวิธี K-means ที่ไม่ถูกต้อง

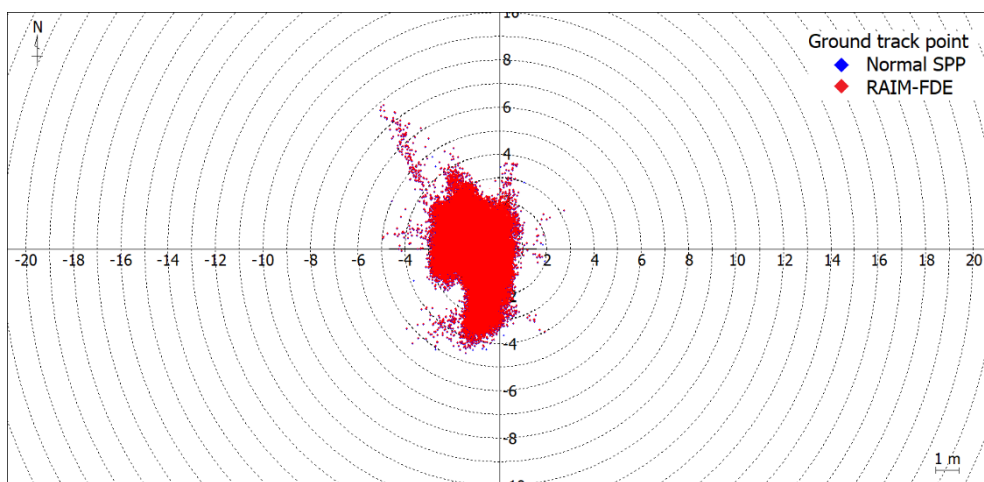
2) ผลการทดสอบด้วยข้อมูลจากจุดทดสอบที่ 2 (บริเวณตาดฟ้าอาคาร)

ในการทดสอบโดยใช้ข้อมูลจากจุดทดสอบที่ 2 บริเวณตาดฟ้าอาคาร ผลแสดงในรูปที่ 5-18

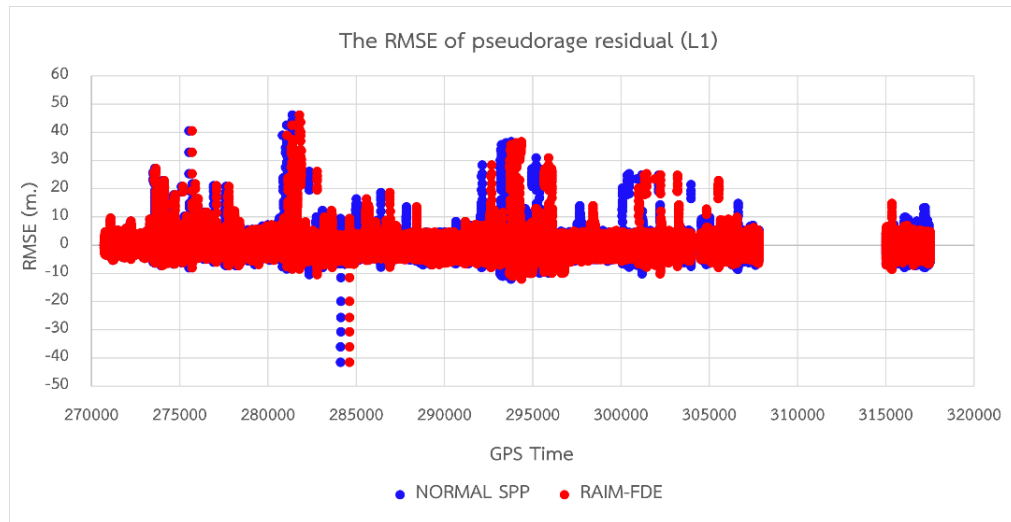


รูปที่ 5-18 แสดงค่า RMSE จากการทดสอบด้วยข้อมูลดาวเทียม 4 ระบบในจุดทดสอบที่ 2

ผลค่า RMSE จากการตัดสัญญาณโดยใช้เทคนิค RAIM-FDE ผลพบว่าแทบไม่แตกต่างจากผลจากวิธีแบบพื้นฐาน โดยค่าคลาดเคลื่อนในทางราบเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.79 (0.03 เมตร) และลดลงในทางตั้งร้อยละ 5.99 (0.13 เมตร) เมื่อพิจารณาค่าเศษเหลือชูดิเรกชันพบว่าแทบไม่ต่างจากเดิมเนื่องจากค่าผลรวมกำลังสองของค่าเศษเหลือ (ค่า SSE) มีค่าเกินกว่า Chi-square threshold ทั้งหมดดังนั้นการตัดดาวเทียม 1 ดวงจากค่า SSE ที่มากที่สุดจึงให้ผลไม่แตกต่าง

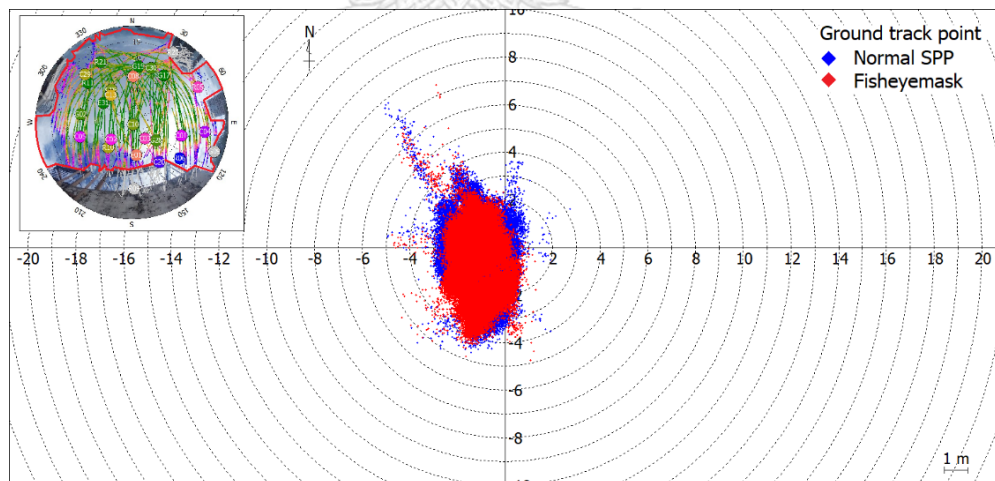


รูปที่ 5-19 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิค RAIM-FDE

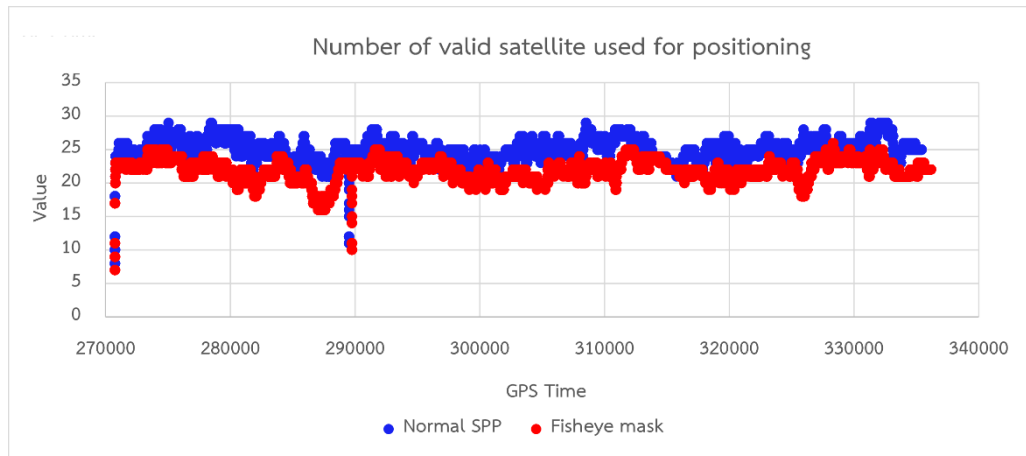


รูปที่ 5-20 แสดงการเปรียบเทียบค่าเศษเหลือซูดเรนจ์จากวิธีแบบพื้นฐานและเทคนิค RAIM-FDE

เมื่อใช้เทคนิคเลือกดาวเทียมโดยอาศัย Mask ค่ามมสูงจากภาพฟิชอาย พบว่าค่า RMSE ในทางดิ่งลดลงร้อยละ 8.76 (0.19 เมตร) อย่างไรก็ตาม ในทิศทางราบค่า RMSE เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.57 (0.06 เมตร) เมื่อพิจารณาถึงจำนวนดาวเทียมจากรูปที่ 5-22 พบว่า แม้การรังวัดด้วยดาวเทียม 4 ระบบจะทำให้มีจำนวนดาวเทียมที่ได้รับโดยเฉลี่ย 22 ดวง อย่างไรก็ตามด้วยสภาพแวดล้อมในการรับสัญญาณที่ไม่ได้มีวัตถุบดบังสูง จึงมีการตัดสัญญาณจากดาวเทียม NLOS โดยเฉลี่ยเพียง 1 ดวง



รูปที่ 5-21 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคที่อาศัยภาพฟิชอาย

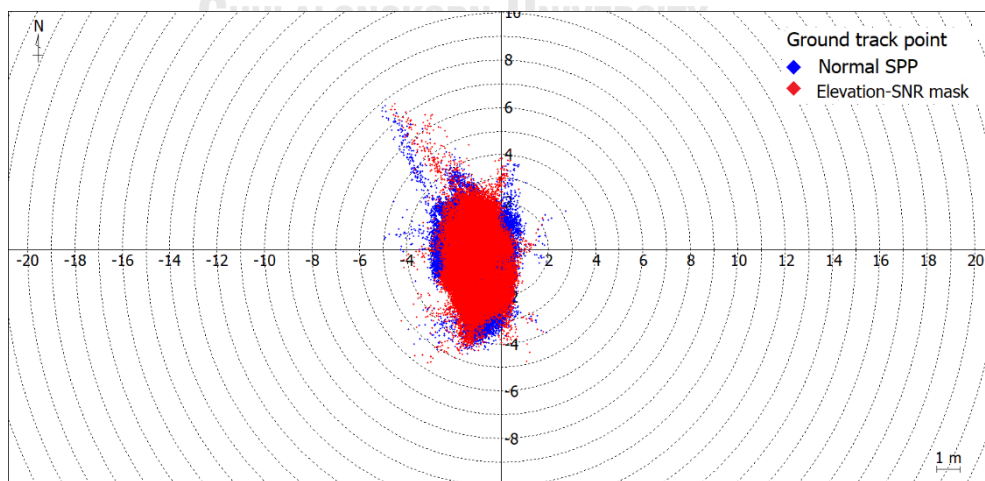


รูปที่ 5-22 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนดาวเทียมจากวิธีแบบพื้นฐานและเทคนิคที่อาศัยภาพฟิชอาย

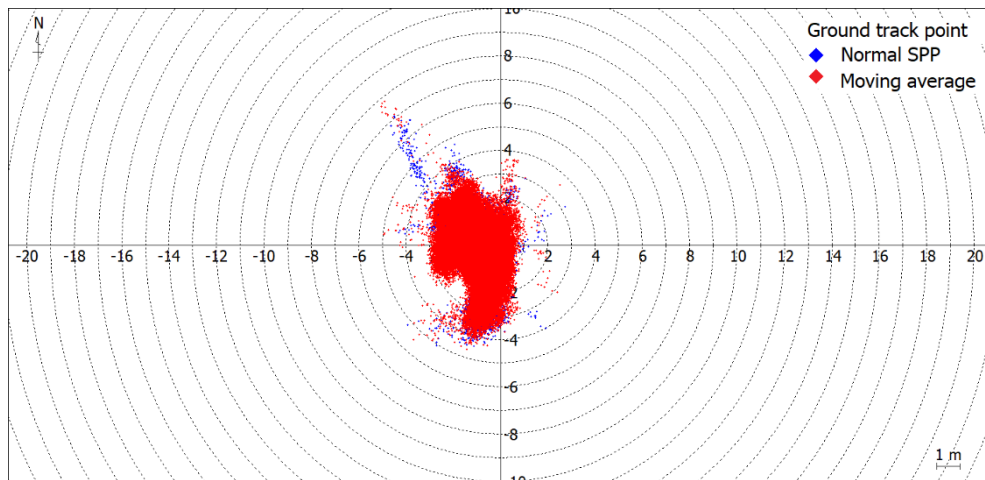
โดยใช้เทคนิคเลือกดาวเทียมโดยอาศัยค่า SNR 3 วิธี ในวิธีแรกเมื่อใช้ค่าเฉลี่ยของค่า SNR โดยกำหนดให้ค่าเทรชโฮลด์ เท่ากับ 10 เดซิเบลเฮิร์ตลบจากค่าเฉลี่ย พบว่าค่า RMSE ในทิศทางราบลดลง ร้อยละ 0.60 (0.01 เมตร) และในทางดิ่งลดลงร้อยละ 10.60 (0.23 เมตร) ดังแสดงในรูปที่ 5-23

เมื่อใช้วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า SNR โดยกำหนดค่าเทรชโฮลด์ เท่ากับ 3 พบว่าผลค่าพิกัดแทบไม่แตกต่างจากผลจากวิธีแบบพื้นฐาน (รูปที่ 5-24) ค่า RMSE ในทิศทางดิ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่ในทางราบลดลงเพียงร้อยละ 1.19 (0.02 เมตร)

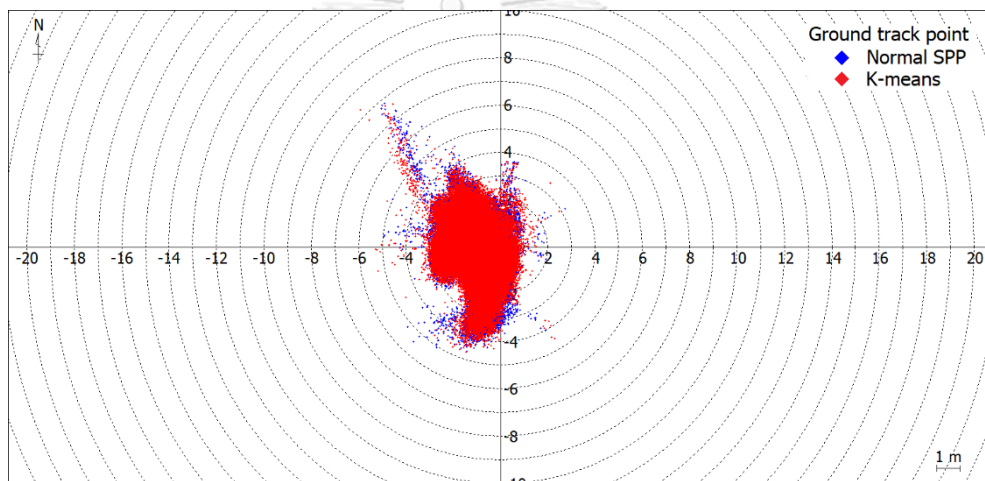
สำหรับวิธี K-means ผลพบว่าทำให้ค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งเพิ่มขึ้น (รูปที่ 5-25) โดยค่า RMSE ในทิศทางราบเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.17 (0.07 เมตร) ในขณะที่ในทางดิ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 17.97 (0.39 เมตร)



รูปที่ 5-23 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR



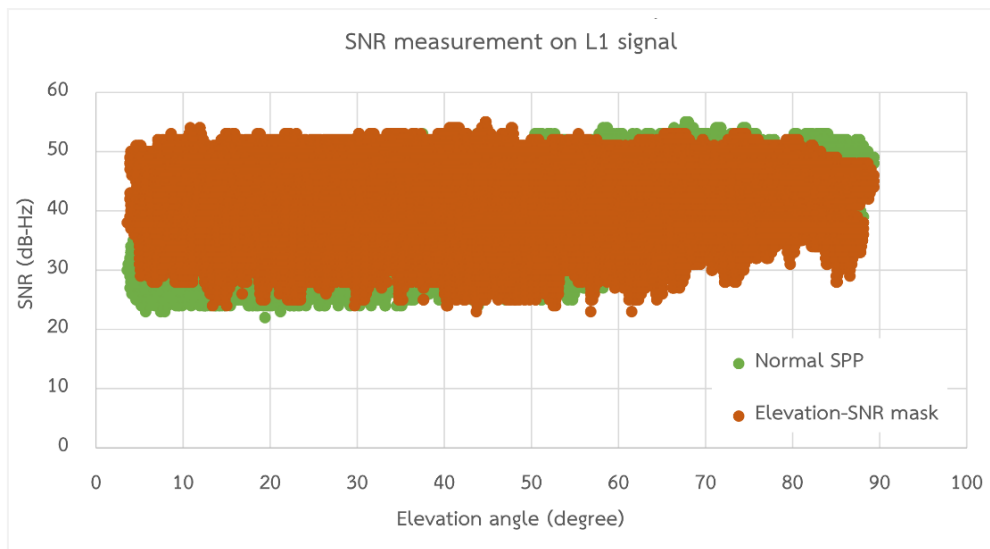
รูปที่ 5-24 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่



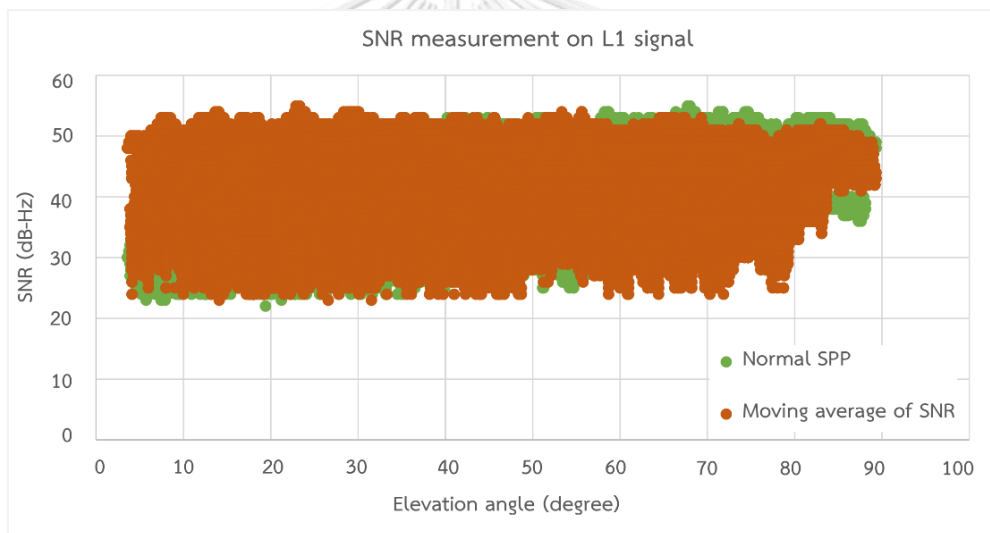
รูปที่ 5-25 แสดงผลจุดค่าพิกัดเปรียบเทียบระหว่างวิธีพื้นฐานและเทคนิคจัดกลุ่มด้วย K-means

เมื่อตรวจสอบลักษณะค่า SNR หลังการตัดสัญญาณโดย 3 เทคนิคข้างต้นพบว่าในเทคนิคที่อาศัยค่าเฉลี่ยที่สัมพันธ์กับค่ามมสูง ค่า SNR ในค่ามมสูงที่ต่ำกว่า 40 องศาเพิ่มขึ้นจากเดิมไม่เกิน 10 เดซิเบลเฮิร์ต ในขณะที่ค่า SNR ในค่ามมสูงที่สูงมากกว่า 60 องศาแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง(รูปที่ 5-26)

สำหรับในเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ค่า SNR แทบไม่ต่างจากค่าที่วัดได้จริงเนื่องจากในข้อมูลดาวเทียมชุดที่ 2 ทำการเก็บสัญญาณบนดาวฟ้าส่งผลให้ค่า SNR ที่วัดได้มีความผันผวนต่ำ ดังนั้นเมื่อกำหนดค่าเทรซโฮลด์ ที่ 3 เดซิเบลเฮิร์ตเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงทำให้มีสัญญาณถูกตัดออกเพียงบางส่วน (รูปที่ 5-27)



รูปที่ 5-26 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม



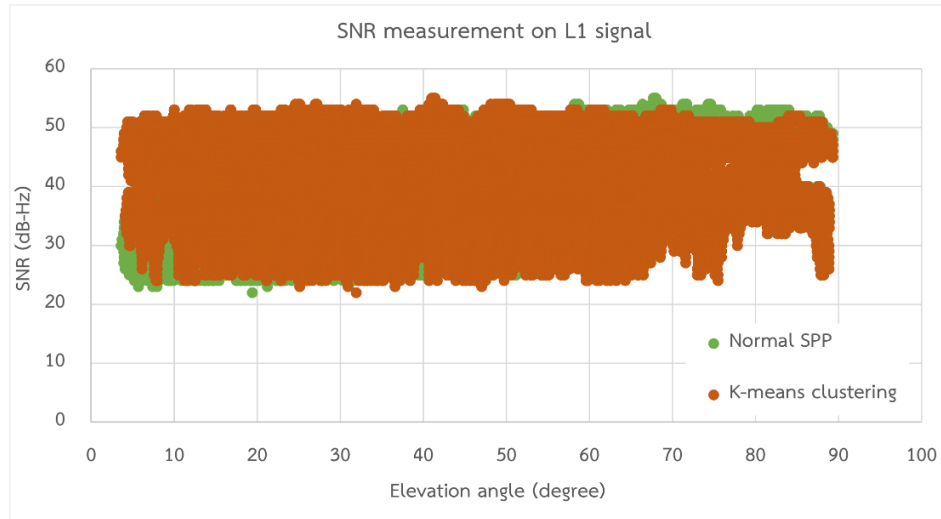
รูปที่ 5-27 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR

สำหรับเทคนิคการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือพบว่าค่า SNR แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงค่ามุมสูงที่ 5 ถึง 70 องศา อย่างไรก็ตามค่า SNR มีความกว้างมากขึ้นจากข้อมูลจริงที่วัดได้ในค่ามุมสูงตั้งแต่ 70 องศาขึ้นไป (รูปที่ 5-28)

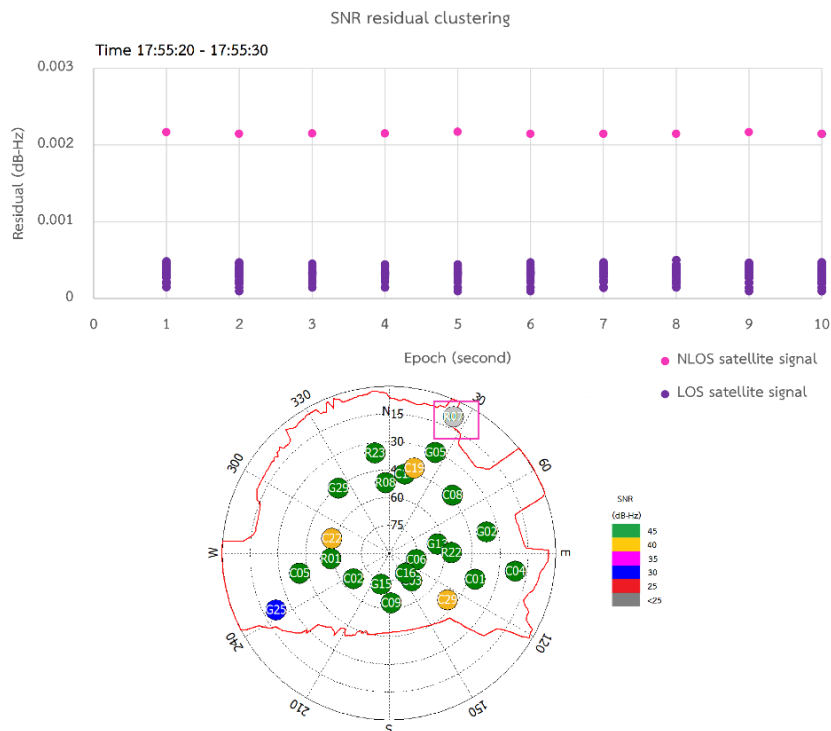
เมื่อวิเคราะห์ผลการจัดกลุ่มดาวเทียมพบว่าค่าเศษเหลือที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกันระหว่างข้อมูล 2 กลุ่ม ส่งผลให้ในบาง Epoch การจัดกลุ่มไม่สอดคล้องกับผลจาก Epoch ก่อนหน้า เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือพบว่าเกิดขึ้นใน 2 กรณี ดังนี้

1) สามารถตรวจจับดาวเทียม NLOS ได้ถูกต้องทั้งหมดในกรณีที่มีการตรวจจับดาวเทียม NLOS เพียง 1 ดวงจากค่าเศษเหลือที่เป็นค่าโดด 1 ดังแสดงจากรูปที่ 5-29

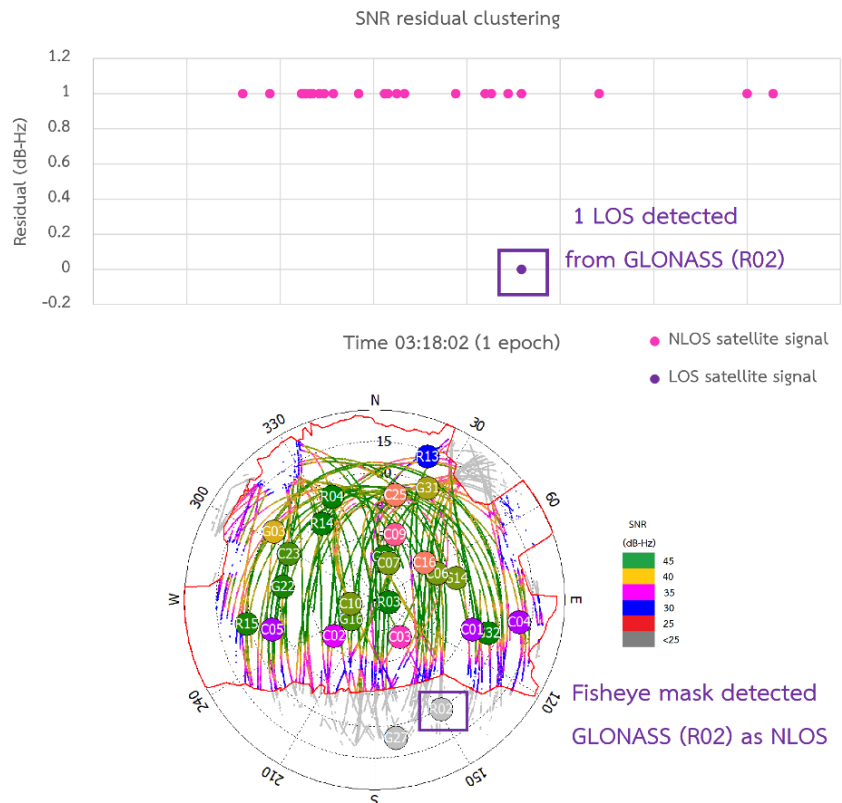
2) ไม่สามารถจัดกลุ่มดาวเทียมได้ถูกต้อง โดยผลจากการจัดกลุ่มขัดแย้งกับชนิดดาวเทียมที่ปรากฏในภาพถ่ายฟิซาย (รูปที่ 5-30 และรูปที่ 5-31)



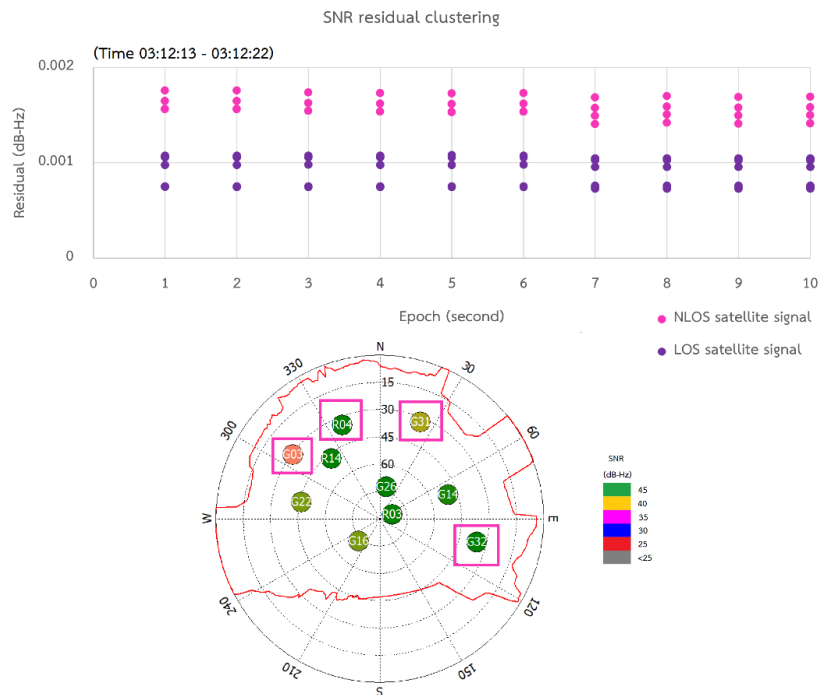
รูปที่ 5-28 แสดงผลค่า SNR จากเทคนิคการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือด้วย K-means



รูปที่ 5-29 แสดงผลการจัดกลุ่มชนิดดาวเทียมด้วยวิธี K-means ที่ถูกต้อง



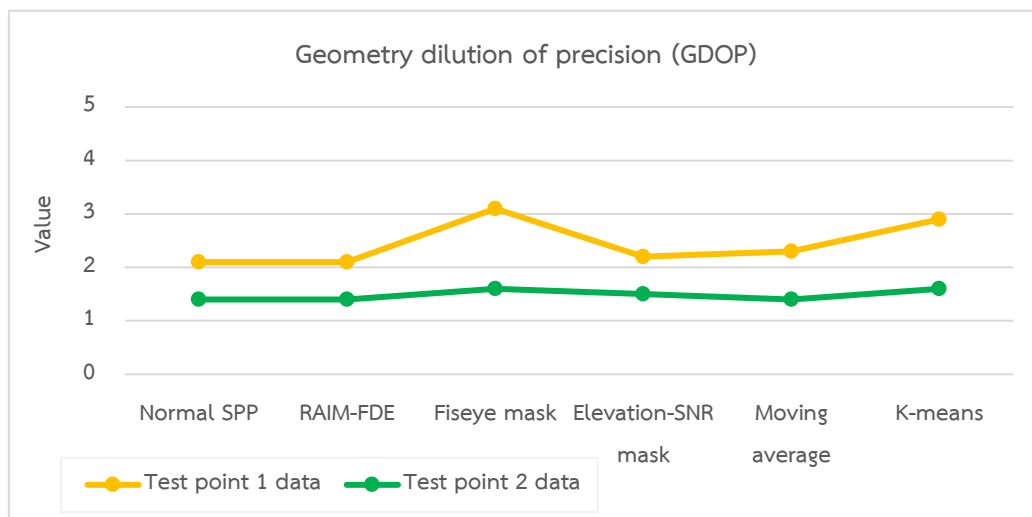
รูปที่ 5-30 แสดงผลการจัดกลุ่มชนิดดาวเทียมด้วยวิธี K-means ที่ไม่ถูกต้อง



รูปที่ 5-31 แสดงผลการจัดกลุ่มด้วยวิธี K-means ที่ไม่สอดคล้องกับผลจากภาพพินซาย

5.2.2 ผลลัพธ์ค่าเรขาคณิตดาวเทียม

ผลการเปลี่ยนแปลงของของค่า GDOP จากการตัดสัญญาณดาวเทียมแสดงดังนี้



รูปที่ 5-32 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่า GDOP

จากกราฟในรูปที่ 5-32 ผลแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า GDOP สามารถแบ่งกลุ่มได้ 3 ระดับ คือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง, เพิ่มขึ้นในระดับต่ำและเพิ่มขึ้นในระดับปานกลาง จากการทดสอบด้วยข้อมูล 2 ชุดพบว่าโดยใช้เทคนิค RAIM ค่า GDOP ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากวิธีพื้นฐาน เมื่อใช้เทคนิคที่อาศัยค่าเฉลี่ยของค่า SNR และเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่า GDOP มีการเพิ่มขึ้นสูงสุดโดยเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 6 ในขณะที่เทคนิค K-means เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 26 และเทคนิคที่อาศัยภาพฟิซอายซึ่งมีการตัดดาวเทียมจำนวนมากที่สุดส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของค่า GDOP สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคทั้งหมด ซึ่งเพิ่มขึ้นจากวิธีพื้นฐานโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 31

5.2.3 ผลลัพธ์การขจัดสัญญาณคลื่นหลายวิถี

ผลการประเมินความสามารถในการขจัดคลื่นหลายวิถีโดยพิจารณาจากร้อยละของอัตราการตัดสัญญาณจากดาวเทียม NLOS โดยเปรียบเทียบเทคนิคที่ใช้กับเทคนิคที่อาศัยภาพฟิซอาย ผลการทดสอบแสดงดังนี้

ตารางที่ 5-1 แสดงอัตราการตัดสัญญาณจากดาวเทียม NLOS ด้วยข้อมูลดาวเทียม 4 ระบบ

Data	Method	NLOS exclusion rate
GPS, GLONASS, Beidou, Galileo (Test point 1)	RAIM-FDE	0.74% (127/17216)
	Fisheye mask	100% (17216/17216)
	Avg.SNR	2.21% (380/17216)
	Moving average	25.81% (4443/17216)
	K-means	50.21% (8644/17216)
GPS, GLONASS, Beidou, Galileo (Test point 2)	RAIM-FDE	4.22% (10221/242288)
	Fisheye mask	100% (242288/242288)
	Avg.SNR	45.28% (109704/242288)
	Moving average	6.81% (16504/242288)
	K-means	54.08% (131030/242288)

จากตารางที่ 5-1 ผลแสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการตรวจจับสัญญาณดาวเทียม NLOS กับเทคนิคที่อาศัยภาพพิกซายที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด เทคนิคที่อาศัยข้อมูลค่า SNR ทั้ง 3 วิธีสามารถตรวจจับสัญญาณ NLOS ได้ในระดับกลางคือไม่เกินร้อยละ 55 ในขณะที่เทคนิค RAIM-FDE มีประสิทธิภาพในการจับสัญญาณดาวเทียม NLOS ในระดับน้อยที่สุดคือไม่เกินร้อยละ 5

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เทคนิคเลือกหรือตัดสัญญาณดาวเทียมเพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีด้วยการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวส่วนใหญ่มุ่งเน้นเทคนิคที่อาศัยค่าพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับลักษณะคลื่นหลายวิถีเพียงด้านใดด้านหนึ่ง อย่างไรก็ตามเมื่อคลื่นหลายวิถีเป็นค่าคลาดเคลื่อนแบบสุ่มและไม่สามารถทราบถึงลักษณะและพฤติกรรมที่แน่นอนได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงลักษณะของค่าพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีทั้งหมด 3 ชนิดได้แก่ ค่าเศษเหลือซูโดเรนจ์, ค่ามุมสูงดาวเทียมและค่า SNR เพื่อหาค่าเกณฑ์หรือเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการเลือกหรือตัดสัญญาณดาวเทียมด้วยเทคนิค 5 วิธี ได้แก่วิธี ได้แก่ 1) การตัดดาวเทียมจากขนาดค่าเศษเหลือด้วยอัลกอริทึม RAIM 2) การตัดดาวเทียมตามค่ามุมสูงดาวเทียมโดยอาศัยภาพถ่ายแบบพีซอาย 3) การตัดดาวเทียมโดยอาศัยค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม 4) การตัดดาวเทียมโดยอาศัยขนาดความผันผวนของค่า SNR และ 5) การตัดดาวเทียมโดยอาศัยการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือของค่า SNR ด้วยวิธี K-means อย่างไรก็ตามเพื่อหาเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับข้อมูล 4 ชุดเพื่อเป็นการตรวจสอบความสอดคล้องของผลลัพธ์ นอกจากนี้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคและสรุปผลหาเทคนิคค่าเหมาะสมที่สุด ในงานวิจัยได้ทำการประเมินผลโดยใช้เกณฑ์ 3 ด้านและมีข้อสรุปดังนี้ (ผลการประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคที่ใช้แสดงในภาคผนวก ก.)

1) สรุปการประเมินผลในด้านการปรับปรุงค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง

จากผลร้อยละของการปรับปรุงค่า RMSE จากวิธีการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว เมื่อทำการทดสอบด้วยเทคนิค RAIM-FDE ซึ่งใช้หลักการตัดสัญญาณที่ไม่มีคุณภาพโดยพิจารณาจากค่าเศษเหลือซูโดเรนจ์ที่มากที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบด้วยทุกชุดข้อมูลดาวเทียมเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือไม่สามารถลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีได้และทำให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งลดลงซึ่งสาเหตุเกิดได้จาก 2 กรณี คือ 1) การตัดดาวเทียมออกเพียง 1 ดวงที่มีค่าผลรวมของเศษเหลือที่มากที่สุดในแต่ละขณะเวลาไม่สามารถทำให้ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีลดลงเนื่องจากในการรับสัญญาณดาวเทียมมากกว่า 1 ระบบดาวเทียมจะมีความเป็นไปได้สูงที่จะมีดาวเทียมที่มีปัญหาหากเกิน

กว่า 1 ดวง 2) เนื่องจากเทคนิค RAIM ใช้การประมวลผลแบบวนซ้ำ ดังนั้นเมื่อเกิดการตัดดาวเทียม ผิดดวงหรือตัดดาวเทียมที่มีผลจากคลื่นหลายวิถีออกไม่หมดจะส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของค่าคลาดเคลื่อนในรอบการประมวลผลถัดไป

สำหรับเทคนิคตัดดาวเทียมโดยใช้ Mask จากภาพฟิชอาย ผลการลดค่า RMSE ขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยคือ จำนวนดาวเทียมที่ได้รับและลักษณะและทิศทางของ Mask ค่ามุมสูง ในสภาพแวดล้อมที่มีความหนาแน่นของวัตถุบดบังการมองเห็นดาวเทียมสูง หากจำนวนดาวเทียมที่ได้รับมากเพียงพอ การตัดดาวเทียมในลักษณะ NLOS ที่เป็นสาเหตุหลักในการรับคลื่นหลายวิถีออกจะทำให้ค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีลดลง ซึ่งค่าจะดีขึ้นในทิศทางราบหรือในทางตั้งขึ้นอยู่กับทิศทางของตำแหน่งดาวเทียมที่ถูกตัดออก ในทางตรงข้ามหาก Mask ถูกสร้างขึ้นภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีสิ่งบดบังสัญญาณเพียงเล็กน้อย การตัดสัญญาณออกจะส่งผลให้ค่าคลาดเคลื่อนเพิ่มสูงขึ้น

ในเทคนิคเลือกดาวเทียมโดยอาศัยค่า SNR ทั้ง 3 วิธี ในวิธีแรกซึ่งเป็นวิธีดั้งเดิมคือการตัดสัญญาณโดยอาศัยค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละค่ามุมสูงดาวเทียมและค่าเทรซโซลต์ ที่เหมาะสมเพื่อใช้ลบออกจากค่าเฉลี่ย ผลการทดสอบกับข้อมูลทุกชุดพบว่าเมื่อกำหนดค่าเทรซโซลต์ เท่ากับ 10 เดซิเบลเฮิร์ตให้ผลลัพธ์ทางตำแหน่งและเรขาคณิตดาวเทียมที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากผลค่าความถูกต้องทางตำแหน่งพบว่าให้ผลที่สอดคล้องกันในทุกชุดข้อมูล คือสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนได้ทั้งในทิศทางราบและในทางตั้งและให้ผลที่ดีกว่าเมื่อทดสอบกับข้อมูลจากดาวเทียม 2 ระบบ (GPS และ GLONASS) ซึ่งที่มีผลจากคลื่นหลายวิถีมากกว่า

ในวิธีที่สองคือการตัดสัญญาณโดยอาศัยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า SNR ซึ่งบ่งชี้ถึงความผันผวนของสัญญาณในแต่ละช่วงเวลาที่มีผลจากการรับคลื่นหลายวิถี เมื่อพิจารณาการกระจายของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานใน 4 ชุดข้อมูลพบว่ามีค่าระหว่าง 0 ถึง 6 เดซิเบลเฮิร์ต และช่วงเวลาที่มีความผันผวนของสัญญาณไม่เกิน 5 นาที ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบเพื่อหาค่า threshold ที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสัญญาณ ผลการทดสอบพบว่า เมื่อกำหนดค่าที่ 3 เดซิเบลเฮิร์ต และขนาดมูฟวิงวินโดว์เท่ากับ 300 วินาที ให้ผลลัพธ์ทางตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด เมื่อพิจารณาผลค่าความถูกต้องทางตำแหน่งพบว่าให้ผลที่ดีขึ้นในทางราบมากกว่าทางตั้ง นอกจากนี้ค่าคลาดเคลื่อนจะลดลงมากกว่าเมื่อทดสอบกับข้อมูลค่า SNR ที่มีความกว้างของสัญญาณมากกว่า

สำหรับในเทคนิคสุดท้ายคือการตัดสัญญาณ NLOS โดยอาศัยการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือของค่า SNR ด้วยวิธี K-means ผลการทดสอบพบว่าความสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนขึ้นอยู่กับความถูกต้องของผลการจัดกลุ่มข้อมูลที่ส่งผลต่อการเลือกตัดดาวเทียมออก จากการทดสอบพบว่าในข้อมูล

ดาวเทียมแบบ 2 ระบบ ค่าเศษเหลือของค่า SNR ที่คำนวณได้ในแต่ละ Epoch มีค่าแตกต่างกันระหว่าง ข้อมูลมากกว่า โดย ค่าเศษเหลือที่ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มดาวเทียม NLOS จะมีลักษณะเป็นค่าโดดอย่าง ชัดเจน ดังนั้นเมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องกับตำแหน่งของดาวเทียมที่ปรากฏในภาพฟิซาย ผลลัพธ์ที่ได้ค่อนข้างสอดคล้องกันแสดงถึงการตัดดาวเทียม NLOS ได้ถูกต้องและทำให้ค่า คลาดเคลื่อนทางตำแหน่งลดลง

ผลจากการทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคตัดสัญญาณดาวเทียม 5 วิธีต่อการลดค่าคลาดเคลื่อน ทางตำแหน่ง เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้พบว่าเทคนิคที่ให้ค่าเหมาะสมที่สุดและให้ผลสอดคล้องกันทุก ชุดข้อมูลทดสอบคือเทคนิคที่อาศัยค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียม โดยใช้ค่า เทรซโฮลด์ ที่ 10 เดซิเบลเอิร์ตลบจากค่าเฉลี่ย ค่า RMSE ลดลงในทิศทางราบสูงสุดที่ร้อยละ 0.65 และในทิศทางตั้งสูงสุดที่ร้อยละ 18.10

2) สรุปการประเมินผลในด้านเรขาคณิตดาวเทียม

การจัดสัญญาณดาวเทียมที่มีผลจากคลื่นหลายวิถีด้วยเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัยส่งผลให้ค่า GDOP เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า GDOP เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการหา ตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวด้วยวิธีพื้นฐานโดยอาศัยการตัดค่ามุมสูงที่ 5 องศา พบว่าค่า GDOP ที่ได้รับมี ค่าระหว่าง 1.4 ถึง 5.2 ซึ่งอยู่ในระดับที่ดีและยอมรับได้และมีค่าเฉลี่ยของร้อยละการเพิ่มขึ้นของค่า GDOP แสดงดังตารางที่ 6-1

ตารางที่ 6-1 แสดงค่าเฉลี่ยของร้อยละการเพิ่มขึ้นของค่า GDOP

Method	GDOP increased (%)
RAIM-FDE	0.00
Fisheye mask	32.64
Elevation dependent SNR mask	4.11
Moving average of SNR	3.52
K-means clustering	17.05

จากตารางที่ 6-1 การเพิ่มขึ้นของค่า GDOP จากเทคนิคทั้งหมดไม่เกินร้อยละ 33 ซึ่งถือว่าอยู่ใน ระดับที่ยอมรับได้และมีการเปลี่ยนแปลงในระดับน้อย เมื่อทำการวิเคราะห์ความสอดคล้องระหว่างผล ค่า RSME ร่วมกับผลค่า GDOP พบว่า ถึงแม้ว่าเทคนิคที่อาศัยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR จะทำให้ ค่า GDOP เพิ่มขึ้นน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสอดคล้องของผลลัพธ์กับค่า RMSE ที่ ได้รับพบว่าจากการใช้ค่าเทรซโฮลด์ ที่แตกต่างกันในบางชุดข้อมูลทดสอบส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของร้อยละ

การเพิ่มขึ้นของค่า GDOP ลดลง ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงความคงที่ของค่าเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสัญญาณ ค่าที่เหมาะสมที่สุดมาจากเทคนิคที่อาศัยค่าเฉลี่ยของค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงดาวเทียมโดยใช้ค่าเทรซโฮลด์ ที่ 10 เดซิเบลเฮิร์ต เนื่องจากสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถีในทุกชุดข้อมูลโดยส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า GDOP น้อยที่สุด

3) สรุปการประเมินผลในด้านความสามารถในการตัดสัญญาณ NLOS

เมื่อพิจารณาอัตราการระหว่างจำนวนดาวเทียมที่ถูกตัดออกด้วยเทคนิคที่ใช้ต่อจำนวนดาวเทียมที่ถูกตัดออกด้วยเทคนิคที่อาศัยภาพฟิชอาย ค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์จาก 4 ชุดข้อมูลแสดงจากตารางที่ 6-2 โดยใช้เทคนิค RAIM-FDE ผลแสดงระดับความสามารถในการตัดสัญญาณ NLOS น้อยที่สุดเนื่องจากใช้หลักการตัดดาวเทียมเพียง 1 ดวงจากค่าเศษเหลือซูเรนจ์ที่มากที่สุด ในทางตรงข้ามโดยใช้เทคนิคที่อาศัยภาพฟิชอายสามารถตัดสัญญาณ NLOS ได้มากที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อมีจำนวนดาวเทียมที่ได้รับไม่มากเพียงพอ การตัดสัญญาณออกจำนวนมากส่งผลให้สัญญาณขาดหายหรือมีดาวเทียมไม่เพียงพอในบางช่วงเวลา ทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ที่มากกว่า 2 เท่าจะค่าที่วัดได้จริง สำหรับเทคนิคอาศัยการจัดกลุ่มค่าเศษเหลือด้วยวิธี K-means ถึงแม้ว่าจะสามารถตัดสัญญาณ NLOS ได้มารองจากเทคนิคที่อาศัยภาพฟิชอายแต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความถูกต้องในการจัดกลุ่มชนิดสัญญาณ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะค่าเศษเหลือของค่า SNR ที่คำนวณได้ดังนั้นจึงสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งได้ในบางชุดข้อมูล

เมื่อวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคที่อาศัยค่า SNR ที่สัมพันธ์กับค่ามุมสูงและเทคนิคที่อาศัยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่า SNR ซึ่งมีความสามารถในการตัดสัญญาณจากดาวเทียม NLOS ใกล้เคียงกันพบว่า เมื่อพิจารณาความสอดคล้องของผลลัพธ์กับค่า RMSE, ค่า GDOP และความคงที่ของค่าเกณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบพบว่าเทคนิคที่อาศัยค่าเฉลี่ยของค่า SNR ให้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในการขจัดผลจากคลื่นหลายวิถี

ตารางที่ 6-2 แสดงค่าเฉลี่ยของการตัดสัญญาณจากดาวเทียม NLOS

Method	NLOS exclusion rate (%)
RAIM-FDE	2.82
Fisheye mask	100.00
Elevation dependent SNR mask	20.06
Moving average of SNR	15.59
K-means clustering	54.45

6.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาและปรับปรุงประสิทธิภาพของเทคนิคตัดดาวเทียมเพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิธีด้วยวิธีหาค่าตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวโดยอาศัยข้อมูลซูโดเรนจ์ในงานวิจัยนี้ยังมีประเด็นที่สามารถศึกษาและพัฒนาเพิ่มเติมในอนาคตดังต่อไปนี้

1) ในการประมวลผลข้อมูลจากเทคนิคที่ใช้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความง่ายต่อการใช้งาน เนื่องจากในแต่ละเทคนิควิธีจะต้องประมวลผลแยกจากกัน ดังนั้นหากสามารถรวบรวมคำสั่งจากเทคนิคต่าง ๆ รวมถึงการพัฒนาและปรับปรุงวิธีในการนำเข้าข้อมูล เช่น การสร้างแบบจำลอง, การปรับแก้ค่าโดยอัตโนมัติ การทดสอบค่าเหมาะสมของค่าเทรซโฮลด์ และการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิคและลดระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลจากการใช้ข้อมูลจำนวนมากได้ นอกจากนี้เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ใช้การทดสอบเบื้องต้นจากรังวัดแบบสถิติซึ่งหากสามารถประยุกต์เทคนิคตัดดาวเทียมในการรังวัดแบบจลน์ในเวลาจริงหรือการหาตำแหน่งโดยอาศัยข้อมูลเฟสคลื่นส่งจะสามารถเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในด้านต่าง ๆ เช่น ระบบนำทาง เป็นต้น

2) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีปรับค่าความผันผวนของสัญญาณโดยใช้เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย (Simple moving average) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดโดยให้ค่าน้ำหนักของข้อมูลเท่ากัน อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีการตัดสัญญาณที่มีค่าต่ำกว่าค่าเทรซโฮลด์ ออกทั้งหมดหรือคงเหลือดาวเทียมไม่เพียงพอต่อการประมวลผลค่าตำแหน่ง การอาศัยเทคนิคที่มีการให้ค่าถ่วงน้ำหนักแก่สัญญาณจะทำให้ไม่มีช่วงเวลาที่สัญญาณขาดหายและทำให้ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับมีความต่อเนื่องเช่นเดียวกันกับการใช้เทคนิคจัดกลุ่มข้อมูลด้วยวิธีพื้นฐานหรือ K-means ที่มีข้อจำกัดในเรื่องความถูกต้องในการจัดกลุ่มข้อมูล ด้วยหลักการประมวลผลของเทคนิคนี้ทำให้ผลลัพธ์ในการจัดกลุ่มแต่ละรอบไม่เหมือนกันเนื่องจากการกำหนดศูนย์กลางกลุ่มแบบสุ่มในขั้นตอนแรก รวมถึงไม่สามารถกำหนดค่าเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่มได้ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิควิธีการจัดกลุ่มที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น การแบ่งกลุ่มข้อมูลด้วย DBSCAN (Density-based spatial clustering of application with noise) หรือการแบ่งกลุ่มข้อมูลที่มีลักษณะการกระจุกตัวของจุดข้อมูลโดยมีลักษณะที่ไม่ตายตัว ซึ่งมีข้อได้เปรียบกว่าเทคนิค K-means ในเรื่องการแยกข้อมูลที่เป็นค่าโดด จากกลุ่มข้อมูลที่มีความหนาแน่นที่ผันผวนและมีรูปแบบหลากหลาย นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเทคนิคเพื่อใช้จัดกลุ่มชนิดสัญญาณโดยตรง เช่น เทคนิค SVM (Support vector machine) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่

ช่วยแก้ปัญหาในการจำแนกข้อมูลโดยใช้หลักการของการหาสัมประสิทธิ์ของสมการเพื่อสร้างเส้นตรง
เพื่อเป็นเส้นเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่มข้อมูลที่ดียิ่งที่สุด เป็นต้น





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

ผลการประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคตัดสัญญาณดาวเทียม

ตารางที่ ก- 1 แสดงผลการประเมินประสิทธิภาพในด้านการปรับปรุงค่าความถูกต้องทางตำแหน่ง

Data	Method	Percentage of accuracy improvement		
		RMSE - H.	RMSE - V.	
Dual-constellation GNSS (GPS & GLONASS)	Test point 1	RAIM-FDE	-34.19	-7.77
		Fisheye mask	-21.16	+44.85
		Elevation dependent SNR mask	+0.65	+18.10
		Moving average of SNR	+0.77	-0.30
		K-means clustering	+1.16	-36.80
	Test point 2	RAIM-FDE	-1.55	-7.82
		Fisheye mask	-15.98	-21.64
		Elevation dependent SNR mask	+0.65	+18.10
		Moving average of SNR	+12.37	+9.78
		K-means clustering	0.00	+1.68
Quad-constellation GNSS (GPS, GLONASS, Beidou & Galileo)	Test point 1	RAIM-FDE	-34.00	-18.23
		Fisheye mask	+28.48	+15.25
		Elevation dependent SNR mask	-0.44%	+0.70%
		Moving average of SNR	+10.15	-5.89
		K-means clustering	+32.45	-14.05
	Test point 2	RAIM-FDE	-1.79	+5.99
		Fisheye mask	-3.57	+8.76
		Elevation dependent SNR mask	+0.60	+10.60
		Moving average of SNR	+1.19	0.00
		K-means clustering	-4.17	-17.97

ตารางที่ ก- 2 แสดงผลการประเมินประสิทธิภาพในด้านเรขาคณิตดาวเทียม

Data	Method	Percentage of GDOP increased	
Dual-constellation GNSS (GPS & GLONASS)	RAIM-FDE	0.00	
	Test point 1	Fisheye mask	-36.84
		Elevation dependent SNR mask	0.00
		Moving average of SNR	0.00
		K-means clustering	-15.79
		RAIM-FDE	0.00
	Test point 2	Fisheye mask	-31.82
		Elevation dependent SNR mask	-4.55
		Moving average of SNR	-4.55
		K-means clustering	0.00
Quad-constellation GNSS (GPS, GLONASS, Beidou & Galileo)		RAIM-FDE	0.00
	Test point 1	Fisheye mask	-47.62
		Elevation dependent SNR mask	-4.76
		Moving average of SNR	-9.52
		K-means clustering	-38.10
		RAIM-FDE	0.00
	Test point 2	Fisheye mask	-14.29
		Elevation dependent SNR mask	-7.14
		Moving average of SNR	0.00
		K-means clustering	-14.29

ตารางที่ ก- 3 แสดงผลการประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคในด้านความสามารถในการ

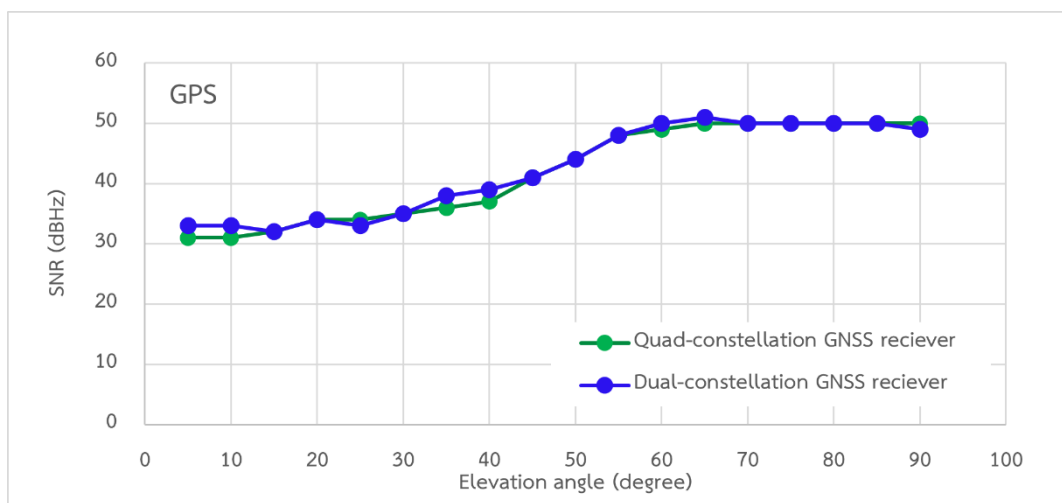
ตัดสัญญาณ NLOS

Data	Method	Percentage of NLOS exclusion rate	
Dual-constellation GNSS (GPS & GLONASS)	RAIM-FDE	3.08	
	Test point 1	Fisheye mask	100.00
		Elevation dependent SNR mask	9.12
		Moving average of SNR	5.81
		K-means clustering	33.26
	Test point 2	RAIM-FDE	3.25
		Fisheye mask	100.00
		Elevation dependent SNR mask	23.65
		Moving average of SNR	23.91
		K-means clustering	80.25
Quad-constellation GNSS (GPS, GLONASS, Beidou & Galileo)	RAIM-FDE	0.74	
	Test point 1	Fisheye mask	100.00
		Elevation dependent SNR mask	2.21
		Moving average of SNR	25.81
		K-means clustering	50.21
	Test point 2	RAIM-FDE	4.22
		Fisheye mask	100.00
		Elevation dependent SNR mask	45.28
		Moving average of SNR	6.81
		K-means clustering	54.08

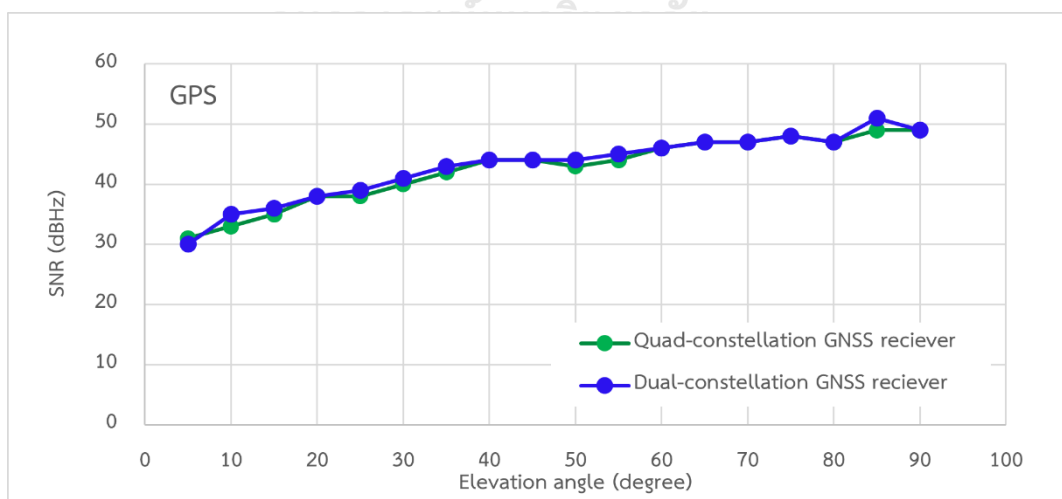
ภาคผนวก ข.

ผลการวัดสอบความถูกต้องของค่า SNR

จากการวัดสอบความถูกต้องของค่า SNR ที่วัดได้จากระบบดาวเทียม GPS (L1) จากเครื่องรับสัญญาณ 2 เครื่องพบว่าในพื้นที่รับสัญญาณที่ 1 (บริเวณหน้าอาคารชั้น 1) และ 2 (บริเวณตาดฟ้าอาคารชั้น 4) ค่าที่วัดได้มีค่าต่างกันไม่เกิน ± 2 เดซิเบลเฮิร์ต ดังแสดงในรูปที่ ข-1 และ ข-2 ตามลำดับ

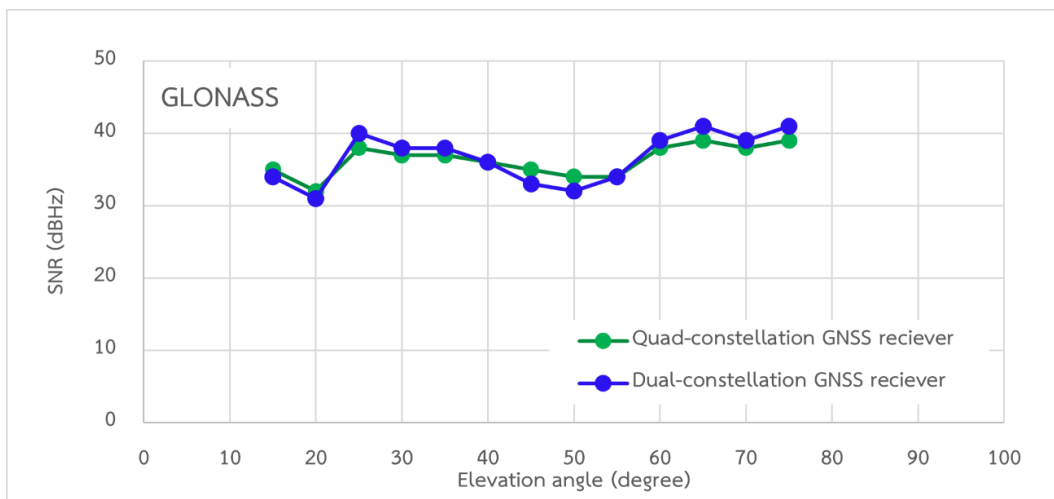


รูปที่ ข- 1 ค่าเฉลี่ยของค่า SNR จากระบบดาวเทียม GPS ในจุดทดสอบที่ 1

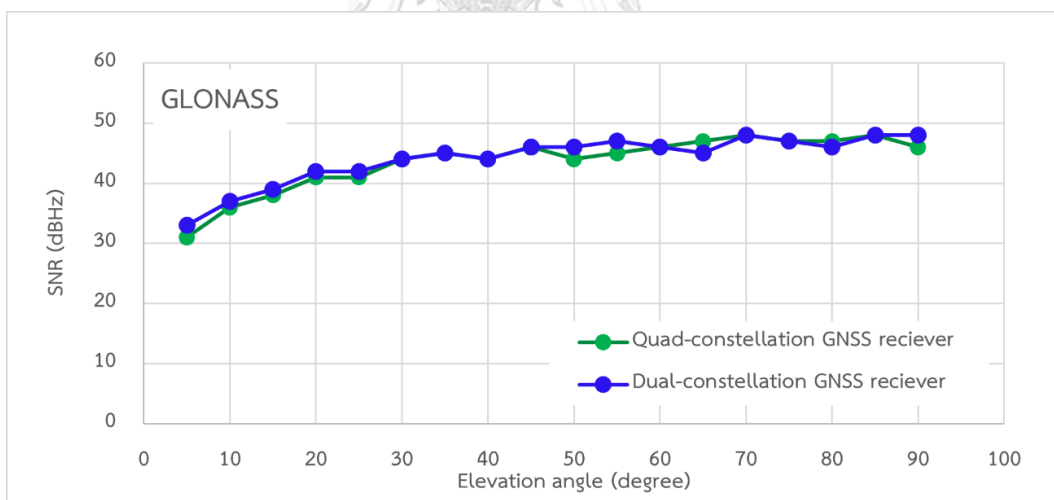


รูปที่ ข- 2 ค่าเฉลี่ยของค่า SNR จากระบบดาวเทียม GPS ในจุดทดสอบที่ 2

จากการวัดสอบความถูกต้องของค่า SNR ที่วัดได้จากระบบดาวเทียม GLONASS (L1) จากเครื่องรับสัญญาณ 2 เครื่องพบว่าในพื้นที่รับสัญญาณที่ 1 และ 2 ค่าที่วัดได้มีค่าต่างกันไม่เกิน ± 2 เดซิเบลเฮิร์ต ดังแสดงในรูปที่ ข-3 และ ข-4 ตามลำดับ

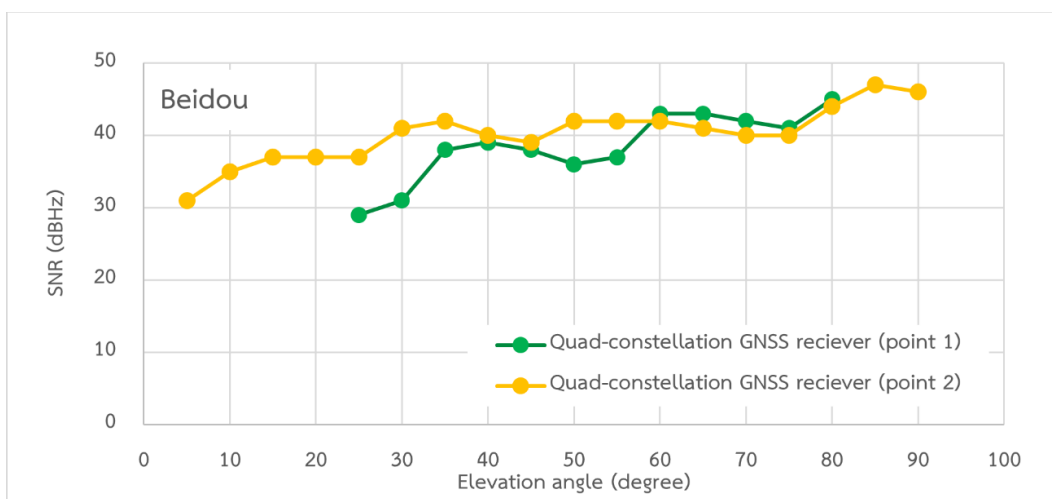


รูปที่ ข- 3 ค่าเฉลี่ยของค่า SNR จากระบบดาวเทียม GLONASS ในจุดทดสอบที่ 1

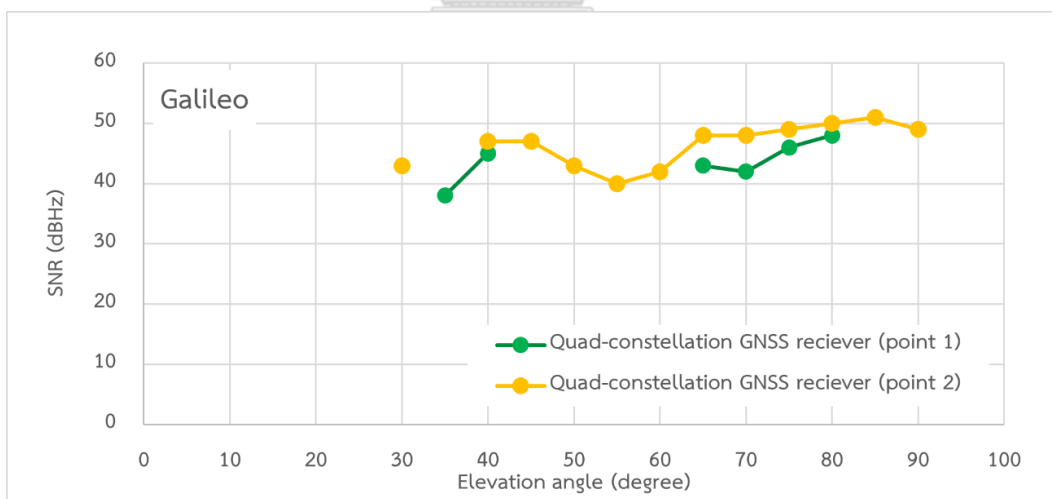


รูปที่ ข- 4 ค่าเฉลี่ยของค่า SNR จากระบบดาวเทียม GLONASS ในจุดทดสอบที่ 2

สำหรับการวัดสอบความถูกต้องของค่า SNR ที่วัดได้จากระบบดาวเทียม Beidou และ Galileo (L1) เนื่องจากทำการรับสัญญาณจากเครื่องรับสัญญาณเดียวกันจึงไม่สามารถเปรียบเทียบค่าได้ ดังนั้นจึงสามารถแสดงค่า SNR ที่วัดได้จาก 2 พื้นที่รับสัญญาณเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ ข-5 และ ข-6



รูปที่ ข- 5 ค่าเฉลี่ยของค่า SNR จากระบบดาวเทียม Beidou ในจุดทดสอบที่ 1 และ 2



รูปที่ ข- 6 ค่าเฉลี่ยของค่า SNR จากระบบดาวเทียม Galileo ในจุดทดสอบที่ 1 และ 2

บรรณานุกรม

- Angelo, J. (2010). GNSS solution: Measuring GNSS Signal Strength. *Inside GNSS*, 20-25.
- Bilich, A., Axelrad, P., & Larson, K. M. (2007). *Scientific Utility of the Signal-to-Noise Ratio (SNR) Reported by Geodetic GPS Receivers*.
- Blanch, J., Walter, T., & Enge, P. (2015). Fast Multiple Fault Exclusion with Large Number of Measurements. *The Proceedings of International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, 696-701.
- CSPS-PPP. Online Precise Point Positioning Service. Retrieved from <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-ouils/ppp.php>
- Dammalage, T., Satirapod, C., Kibe, S., & Ogaja, C. (2020). Wavelet Transform Application to C/A Code Multipath Mitigation at GPS Reference Stations for Improved Differential GPS Corrections. *Survey Review*, 42, 240-255.
doi:10.1179/003962610X 12572516251925
- Fang, Y., Hong, Y., Zhou, O., Liang, W., & Liu, W. (2015). A GNSS Satellite Selection Method Based on SNR Fluctuation in Multipath Environments. *Int J Control Autom Syst*, 8(11). doi:10.14257/ijca.2015.8.11.30
- Gerald, C. F., & Wheatley, P. O. (2004). *Applied Numerical Analysis (Seventh edition)*: PEARSON.
- Groves, P. (2013). GNSS solutions: multipath vs. NLOS signals. How does non-line-of-sight reception differ from multipath interference. *Inside GNSS*, 8(6), 40-44.
- Groves, P., Jiang, Z., Rudi, M., & Philip, S. (2013). *A Portfolio Approach to NLOS and Multipath Mitigation in Dense Urban Area*. Paper presented at the The 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION 2013), Nashville Convention Center, Nashville, Tennessee, Nashville, TN.
- Hsu, L.-T., Gu, Y., & Kamijo, S. (2015). NLOS Correction/Exclusion for GNSS Measurement Using RAIM and City Building Models. *Sensors(Basel)*, 15(7), 17329-17349.
doi:10.3390/s150717329
- Hsu, L.-T., Tokura, H., Nobuaki, K., Gu, Y., & Kamijo, S. (2016). Multiple Faulty GNSS

- Measurement Exclusion Based on Consistency Check in Urban Canyons. *IEEE Sensors*, 17(6), 1909-1907. doi:10.1109/JSEN.2017.2654359
- Iwase, T., Suzuki, N., & Watanabe, Y. (2013). Estimation and Exclusion of Multipath Range Error for Robust Positioning. *GPS solution*, 17(1), 53-62. doi:10.1007/s10291-012-0260-1
- Langley, R. B. (1999). Dilution of precision. *Innovation*. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/c04c/d3dc971734ebe2ba1aa113e417e8b28b248c.pdf>
- Leick, A. (2004). *GPS satellite surveying third edition*. Newyork: John Wiley & Sons.
- Lin, K. Q., Deng, Z. L., & Yin, L. (2018). *Effective Multipath Mitigation Methods for RTK in Urban Environments*. Paper presented at the The Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2018, Beijing, China.
- Matera, R. E., Peña, G. A. J., Olivier, J., Carl, M., & Bertrand, E. (2019). *Characterization of Line-of-Sight and Non-Line-of-Sight Pseudorange Multipath Errors in Urban Environment for GPS and Galileo*. Paper presented at the The Proceedings of 2019 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Hyatt Regency Reston, Reston, Virginia.
- Petovello, M. (2013). Multipath vs. NLOS signal. Retrieved from <https://insidegnss.com/multipath-vs-nlos-signals/>
- Rizos, C. (1997). *Principles and practice of GPS surveying*. Australia: The School of Geomatic Engineering, The University of New South Wales Sydney NSW 2052.
- Sánchez, J. S., Thevenon, P., Gerhmann, A., & Brocard, P. (2017). *Use of a Fisheye Camera for GNSS NLOS Exclusion and Characterization in Urban Environments*. Paper presented at the The Proceedings of 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Hyatt Regency Monterey, Monterey, California.
- Satirapod, C., & Rizos, C. (2005). Multipath Mitigation by Wavelet Analysis for GPS Base Station Applications. *Survey Review*, 28(295), 2-10. doi:10.1179/sre.2005.38.295.2
- Shirai, T., & Nobuaki, K. (2011). RTK-GPS Reliability Improvement in Dense Urban Areas. *The proceeding of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2011)*, 60, 960-967. doi:10.2322/jjsass.60.40

- Špánik, P., & Hefty, J. (2017). Multipath Detection with the Combination of SNR Measurements – Example from Urban Environment. *Geodesy and cartography*, 66(2), 305-315. doi:10.1515/geocart-2017-0020
- Suzuki, T. (2011). High-accuracy GPS and GLONASS Positioning by Multipath Mitigation Using Omnidirectional Infrared Camera. *IEE International conference on robotic and automation*, 311-316. doi:10.1109/ICRA.2011.5980424
- Suzuki, T., & Nobuaki, K. (2015). *Simulation of GNSS Satellite Availability in Urban Environments Using Google Earth*. Paper presented at the The Proceedings of the ION 2015 Pacific PNT Meeting, Marriott Waikiki Beach Resort & Spa, Honolulu, Hawaii.
- Suzuki, T., Nobuaki, K., & Yasuda, A. (2004). *The Possibility of the Precise Positioning and Multipath Error Mitigation in Real-Time*. Paper presented at the The 2004 International Symposium on GNSS/GPS, Sydney, Australia.
- Takasu, T. (2013). *RTKLIB ver.2.4.2 manual*.
- Teunissen, P. J., & Montenbruck, O. (2017). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*: Springer International Publishing AG 2017.
- Tokura, H. (2016). Effective satellite selection methods for RTK-GNSS NLOS exclusion in dense urban environments. *Proceedings of the 29th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016)*, 304-312. doi:10.33012/2016.14801
- Tokura, H., & Nobuaki, K. (2014). Using Multiple GNSS Constellations with Strict Quality Constraints for More Accurate Positioning in Urban Environments. *Scientific Research Publishing*, 5(4), 85-96. doi:10.4236/pos.2014.54011
- Tokura, H., & Nobuaki, K. (2016). *Effective Satellite Selection Methods for RTK-GNSS NLOS Exclusion in Dense Urban Environments*. Paper presented at the The 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016), Oregon Convention Center, Portland, Oregon.
- Tokura, H., & Nobuaki, K. (2017). Efficient Satellite Selection Method for Instantaneous RTK-GNSS in Challenging Environments. *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci*, 60(4), 221-229. doi:10.2322/tjsass.60.221
- Tongleamnak, S., & Nagai, M. (2017). Simulation of GNSS Availability in Urban

- Environments Using a PAranomic Image Dataset. *Hindawi International Journal of Navigation and Observation*, 2017. doi:10.1155/2017/8047158
- Townsend, B., & Fenton, P. (1994). *A Practical Approach to the Reduction of Pseudorange Multipath Errors in a L1 GPS Receiver*. Paper presented at the The Proceedings of the 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Palace Convention Center, Salt Lake City, UT.
- Uaratanawong, V., Satirapod, C., & Tsujii, T. (2020). Optimization Technique for Pseudorange Multipath Mitigation Using Different Signal Selection Methods. *Artificial Satellites*, 55(2), 77-86. doi:10.2478/arsa-2020-0006
- Uaratanawong, V., Satirapod, C., & Tsujii, T. (2021). Evaluation of Multipath Mitigation Performance Using Signal-to-Noise Ratio (SNR) Based Signal Selection Methods. *Journal of Applied Geodesy*, 15(1), 75-85. doi:10.1515/jag-2020-0045
- Wang, E., Cai, M., & Pang, T. (2012). *A Simple and Effective GPS Receiver Autonomous Integrity Monitoring and Fault Isolation Approach*. Paper presented at the International Conference on Control Engineering and Communication Technology, US.
- Yamamoto, H., Nobuaki, K., & Takusu, T. (2015). Satellite Based Train Positioning Using Three-Dimensional Track Maps. . *QR of RTRI*, 194-199. doi:10.2219/rtriqr.56.194



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วลัญชอร์ เอื้อรัตน์วงศ์
วัน เดือน ปี เกิด	23 กุมภาพันธ์ 2530
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	อ.ม.(ภูมิศาสตร์และภูมิสารสนเทศ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อ.บ.(ภูมิศาสตร์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	38/167 ซอย บางกรวย -ไทรน้อย2 ถนน บางกรวย-ไทรน้อย ตำบล บางกรวย อำเภอบางกรวย จังหวัด นนทบุรี รหัสไปรษณีย์ 11130
ผลงานตีพิมพ์	วลัญชอร์ เอื้อรัตน์วงศ์ และพรรณี ชีวินศิริวัฒน์ (2559). การประยุกต์ระบบ สารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อโรคไข้หวัดใหญ่ใน กรุงเทพมหานคร. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 6, ศูนย์มานุษยวิทยาสิรินธร (องค์การมหาชน) กรุงเทพฯ, บัณฑิต วิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร. Uaratanawong V, Satirapod C, Tsujii T. Optimization Technique for Pseudorange Multipath Mitigation Using Different Signal Selection Methods. Artificial Satellites, 2020; 55(2): 77-86. Available from: 10.2478/arsa-2020-0006 Uaratanawong V, Satirapod C, Tsujii T. Evaluation of multipath mitigation performance using signal-to-noise ratio (SNR) based signal selection methods. Journal of Applied Geodesy, 2021; 15(1):75-85. Available from: 10.1515/jag-2020-0045